

## СИСТЕМНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ

№ 4

2010

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

**С.М. ГРИША**, проф., д. т. н.

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

**В.І. КОСТЮК**, проф., д. т. н.

**В.М. КУНЦЕВИЧ**, акад. НАН України

**Г.М. ЛУЦЬКИЙ**, проф., д. т. н.

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

**О.А. МОЛЧАНОВ**, проф., д. т. н.

**В.В. ОСТАПЕНКО**, проф., д. ф.-м.н.

**О.А. ПАВЛОВ**, проф., д. т. н.

**В.Н. РЕДЬКО**, акад. НАН України

**Т.Л. СААТІ**, проф., США

**Л. САКАЛАУСКАС**, проф., Литва

**І.В. СЕРГІЄНКО**, акад. НАН України

**В.П. ТАРАСЕНКО**, проф., д. т. н.

**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.com.ua>

### У номері:

- **Теоретичні та прикладні проблеми і методи системного аналізу**
- **Прогресивні інформаційні технології, високопродуктивні комп'ютерні системи**
- **Проблеми прийняття рішень і управління в економічних, технічних, екологічних і соціальних системах**
- **Проблемно і функціонально орієнтовані комп'ютерні системи та мережі**
- **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

№ 4

2010

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

**S.N. GRISHA,** Prof., Ukraine

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

**V.I. KOSTJUK,** Prof., Ukraine

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

**G.M. LUTSKY,** Prof., Ukraine

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

**A.A. MOLCHANOV,** Prof., Ukraine

**V.V. OSTAPENKO,** Prof., Ukraine

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

**V.N. REDKO,** Academician of NASU

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

**L. SAKALAIUSKAS** Prof., Lithuania

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

**V.P. TARASENKO,** Prof., Ukraine

**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.com.ua

### In the issue:

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

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

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

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

• **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 і 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 15.12.2010. Формат 70x108/16.

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

Свідоцтво про реєстрацію КВ № 13804–2778 ІПР 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 Zaharovich Zgurovsky.

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

# СИСТЕМНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

4 • 2010

## ЗМІСТ

<b>ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРИКЛАДНІ ПРОБЛЕМИ І МЕТОДИ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ</b>	
<i>Редько И.В.</i> Открыто-замкнутые основания сред интеграции. Часть I .....	7
<i>Matsuki Y., Brondzia O., Maslukivska O.</i> External cost as an indicator for sustainable electricity generation system .....	18
<b>ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ВИСОКОПРОДУКТИВНІ КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ</b>	
<i>Руденко С.С., Буждиган О.Я.</i> Адаптація технологій рольового мережевого аналізу «regular equivalence» та «regular role coloration» для побудови трофічних мереж пасторальних екосистем .....	33
<i>Paksoy T., Özceylan E., Weber G.-W.</i> A multi-objective mixed integer programming model for multi echelon supply chain network design and optimization .....	47
<i>Мухин В.Е.</i> Инструментарий минимизации риска защищенности в распределенных системах (РКС) .....	58
<b>ПРОБЛЕМИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ І УПРАВЛІННЯ В ЕКОНОМІЧНИХ, ТЕХНІЧНИХ, ЕКОЛОГІЧНИХ І СОЦІАЛЬНИХ СИСТЕМАХ</b>	
<i>Андреев М.В.</i> Теорія прийняття рішень у задачах оптимальної зупинки .....	69
<i>Кірік О.С., Остапенко В.В.</i> Оптимальний розподіл гідроресурсів у зрошувальних системах мережевої структури .....	79
<i>Жданова І.В., Новіков О.М.</i> Керування односторонніми процесами фільтрації в'язких нафт за наявності граничного градієнта тиску .....	91
<i>Козуля Т.В., Шаронова Н.В.</i> Практична реалізація концепції корпоративної екологічної системи для інтегральної оцінки екологічного ризику здоров'ю .....	100
<b>ПРОБЛЕМНО І ФУНКЦІОНАЛЬНО ОРІЄНТОВАНІ КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ ТА МЕРЕЖІ</b>	
<i>Мальшевский А.Г.</i> Приоритезация тестов как метод быстрого выявления серьезных ошибок .....	110
<b>НОВІ МЕТОДИ В СИСТЕМНОМУ АНАЛІЗІ, ІНФОРМАТИЦІ ТА ТЕОРІЇ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ</b>	
<i>Повещенко Г.П.</i> Элементы информационной динамики .....	129
<b>НАУКОВА ІНФОРМАЦІЯ</b>	
<i>О конечномерных гиперкомплексных числовых системах — кардинальном развитии теории представления и обработки данных в информатике .....</i>	142
Реферати .....	144
Відомості про авторів .....	148
Зміст журналу «Системні дослідження та інформаційні технології» за 2010 р. ....	149
Автори статей за 2010 р.	

# SYSTEM RESEARCH AND INFORMATION TECHNOLOGIES

4 • 2010

## CONTENTS

<b>THEORETICAL AND APPLIED PROBLEMS AND METHODS OF SYSTEM ANALYSIS</b>	
<i>Redko I.V.</i> Open-and-closed principles of integration environments. Part I .....	7
<i>Matsuki Y., Brondzia O., Maslukivska O.</i> External cost as an indicator for sustainable electricity generation system .....	18
<b>PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES, HIGH-EFFICIENCY COMPUTER SYSTEMS</b>	
<i>Rudenko S.S., Buzgdihan O.Ja.</i> Adaptation of technologies of the role network analysis «regular equivalence» and «regular role coloration» to construction of pasture ecosystem trophic networks .....	33
<i>Paksoy T., Özceylan E., Weber G.-W.</i> A multi-objective mixed integer programming model for multi echelon supply chain network design and optimization .....	47
<i>Mukhin V.Ye.</i> Means for security risk minimization in distributed computer systems ....	58
<b>DECISION MAKING AND CONTROL IN ECONOMIC, TECHNICAL, ECOLOGICAL AND SOCIAL SYSTEMS</b>	
<i>Andreev N.V.</i> Decision making theory in optimal stopping problems .....	69
<i>Kirik O.E., Ostapenko V.V.</i> Optimal hydroresources distribution in network-structured irrigation systems .....	79
<i>Zhdanova I.V., Novikov O.M.</i> Control of one-sided viscous oil filtration process under conditions of limited pressure gradient .....	91
<i>Kozulia T.V., Sharonova N.V.</i> Practical realisation of the corporative ecological system concept for integral estimation of ecological health risk .....	100
<b>PROBLEM- AND FUNCTION-ORIENTED COMPUTER SYSTEMS AND NETWORKS</b>	
<i>Malishevsky A.G.</i> Prioritization of tests as a method for fast detection of faults .....	110
<b>NEW METHODS IN SYSTEM ANALYSIS, COMPUTER SCIENCE AND THEORY OF DECISION MAKING</b>	
<i>Poveshchenko G.P.</i> Elements of information dynamics .....	129
<b>SCIENTIFIC INFORMATION</b>	
<i>On finite-dimensional hypercomplex numerical systems — cardinal development of the representation theory and data processing in computer science .....</i>	142
References .....	144
Information about the authors .....	148
Contents of journal «System Research & Information technologies» over 2010 .....	149
Information about the authors over 2010	

УДК 681.3.06

## ОТКРЫТО-ЗАМКНУТЫЕ ОСНОВАНИЯ СРЕД ИНТЕГРАЦИИ.

### ЧАСТЬ I

И.В. РЕДЬКО

В рамках концепции ОС-System рассмотрены понятия среды интеграции и интеграционной системы. Разработан универсальный метод эволюционного обогащения сущностей. Введено понятие оракульной среды интеграции и дана классификация таких сред. Описано применение метода эволюционного обогащения к сущностям типа бизнес-процесса в предметной области.

#### ВВЕДЕНИЕ

Сегодня стало нормой, характеризуя состояние дел в информатико-технологической сфере и, в особенности в программировании, сослаться на впечатляющие результаты практического программостроения, которые «говорят сами за себя». В этой ситуации, рассуждения о наличии серьезных кризисных явлений в этой области, казалось бы, безосновательны. И, тем не менее, вся история развития информатики это фактически история относительных всплесков и затуханий борьбы с периодически возникающими на этом пути кризисными явлениями. Рассматривая в контексте сказанного современное состояние компьютерной науки и, в частности, характерный для данного этапа рост количества работ, авторы которых говорят о кризисе программирования как о свершившемся факте [1, 2, 3], можно констатировать, что информатико-технологическая отрасль стоит на пороге очередного «кризисного» всплеска.

**Цель работы** — прояснить отдельные аспекты сложившегося положения, проанализировать основные причины отмеченного противоречия и наметить пути его разрешения. Это основная цель этой и быть может нескольких последующих работ.

Рассмотрения проводятся в рамках концепции открыто-замкнутых систем (ОС-System). Основное внимание уделено разъяснению логико-предметной взаимосвязи понятий открыто-замкнутой среды (ОЗСР) и открыто-замкнутой системы (ОЗС) как ключевого элемента системы пошаговых обогащений рассмотрения. Все используемые и не излагаемые в работе определения и результаты понимаются в смысле [4–6].

## ПРИРОДА КРИЗИСНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ПРОГРАММИРОВАНИИ В ПЕРВОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

Говоря о кризисе в программировании, чаще всего отмечают преимущественно экстенсиональную (объемную) природу даже наиболее значимых на момент констатации достижений практического программирования. Это, в частности, выражается в том, что несмотря на очевидные успехи в построении отдельных информатико-технологических систем (ИТС), их все возрастающее количество не приводит к качественным (интенциональным) изменениям. Причина этого состоит, прежде всего, в том, что продуцирование отдельных, даже весьма эффективных решений не решает проблем, связанных с их адекватной интеграцией. Значимость интеграционной проблематики сегодня признается практически всеми. И поэтому неудивителен стабильный рост количества IT-компаний, позиционирующих себя на рынке IT-услуг как системных интеграторов. При этом современное состояние этой проблематики характерно тем, что применяемые здесь методы решения задач также носят явно выраженную экстенсиональную природу. Содержательно говоря, все они поддерживают стратегию интеграции решений «от достигнутого». Т.е. ориентированы исключительно на поддержание того или иного спектра потенциально возможных интеграций отдельных IT-решений. При этом, фигурально выражаясь, «с водой выплескивается и ребенок». Ведь для интеграционных задач не столько важна потенциальная возможность их решения, сколько то, что за любой из них стоит определенный прагматикой решаемой задачи смысл (интенционал). Ведь эффективное решение интеграционной задачи возможно только посредством учета ее интенционала в рассмотрении. Это, как было показано, например, в [3–8], обусловливает рассмотрение сред интеграции (ИСП), поддерживающих смыслы задач. Поэтому создание инструментария, поддерживающего создание прагматико-обусловленных ИСП, является ключевой задачей в интеграционной проблематике.

Содержательный смысл ИСП состоит в том, что она, во-первых, презентует прагматико-обусловленную связь между проблемой и отдельными составляющими ее решения и, во-вторых, что наиболее важно, эта связь является ключевой составляющей решения проблемы. В более общей постановке можно сказать, что действительность, как носитель любой деятельности и прежде всего решения проблем, неразрывно связана с теми или иными сущностями. Ввиду этого, невозможно постичь действительность, а значит и решить проблему не познав как сами сущности, так и природу их связи. В первом приближении последняя обусловлена ранжированием вовлекаемых в рассмотрение сущностей по степени их значимости в контексте изучаемой проблемы. Это разделение на значимое и незначительное в их взаимосвязи в рассмотрении любой деятельности составляет фундамент концепции открыто-замкнутых систем (OC-System) [4–6].

Специфика подавляющего большинства современных задач такова, что осуществить разделение на главное и второстепенное «раз и навсегда» не представляется возможным. Чаще всего решение носит многошаговый характер. Более того, сама многошаговость при этом может быть как угодно сложно устроена и, в общем случае, пока не приходится даже ставить во-



прос о ее законченном обозрении. Поэтому, по-видимому единственное, о чем реально сегодня говорить, это об инструменте, который хотя бы поддерживал осуществление шагов в «правильном» направлении. Последнее означает, что каждый такой шаг должен как минимум не разрушать достигнутой уровень разделения на главное и второстепенное. В этом смысле он должен быть корректным к такому ранжированию и сохранять его.

Содержательно говоря, этот инструмент представляет собой универсальное средство обогащения рассматриваемых проблем. Поэтому природа его сложна, более того, она неразрывно связана со смыслами решаемых проблем и задач. Для некоторых из них она может носить законченный (актуальный, объективный) характер. Тогда это означает, что вся сложность решаемой проблемы обусловлена лишь сложностью собственно цепочек однотипных шагов, природа которых может быть инкапсулирована. Однако для большинства задач и, в первую очередь для тех, которые носят *системный* характер, этот инструмент не может быть объективизирован окончательно. Содержательно говоря, в цепочках решений таких задач осуществляемые шаги по субъективным причинам могут сколь угодно сильно отличаться один от другого. Поддержать такую непохожесть на системном уровне возможно только обеспечив *открытость* рассмотрения для активных воздействий субъектов, осуществляющих упомянутые шаги. Основным инструментом такой субъективизации являются, как известно, оракулы (параметры) [9, 10]. Присущее оракулам взаимодействие их активной и пассивной ролей, позволяющее естественным образом вовлечь в рассмотрение динамику процессов, действий, составляет фундамент любых системных исследований. Ведь хорошо известно, что сущности проявляются в действиях биабстрактная природа которых индуцирована, прежде всего, взаимодействием активной и пассивной точек зрения на них, выражающаяся, в частности, в неразрывной связи ассоциированных с любым действием процесса и его результата [3–8]. Ключевую роль во вскрытии сути этой связи играет разъяснение логико-предметной взаимосвязи понятий ОЗСР и ОЗС как основного элемента системы пошаговых обогащений рассмотрения.

## ОБЩИЙ ВЗГЛЯД НА ОЗС И ОЗСР

В первом приближении суть излагаемого в данной работе подхода к построению ИТС состоит в отыскании прагматико-обусловленного компромисса между замкнутой и открытой точками зрения на них. Известно, что наряду с бесспорными достоинствами, последние имеют принципиальные недостатки, которые все более доминируют. Это делает актуальным формирование такой точки зрения, которая бы по возможности была свободна от таких недостатков, сохраняя при этом достоинства и тех и других. Эту точку зрения, сохраняя преемственность достоинств, назовем открыто-замкнутой. Поддержать упомянутый компромисс значит, в первую очередь, найти причины недостатков.

Обстоятельный анализ, проведенный в [6–8], позволил не только более отчетливо увидеть эти причины, но и вскрыть их *первопричину*, составившую основу компромисса. В первом приближении она состоит в том, что ни замкнутые, ни открытые системы не поддерживают изучение вовлекаемых в рассмотрение сущностей с учетом их прагматико-обусловленной значимо-

сти. Таким образом, естественно приходим к выводу о том, что любая ОЗС должна поддерживать не только вышеуказанное прагматико-обусловленное ранжирование рассмотрений по степени значимости, но, что наиболее важно, и их взаимосвязь. При этом разница в значимости здесь не просто декларируется, а естественно реализуется в виде принципиально разного использования значимого и второстепенного как прагматико-обусловленных типов абстракции. Первое образует прагматико-обусловленное замкнутое ядро, второе есть представителем открытой системы продолжений этого ядра. Это позволяет с самой общей точки зрения смотреть на ОЗС как на прагматико-зависимую биабстрактную связь относительно автономизированных замкнутой (в этом смысле общезначимой, логической) и предметной частей системы как принципиально разных типов абстракции. Логико-предметная направленность является определяющей в целом для концепции ОС-System. При этом, конечно, как логика, так и предмет здесь понимаются релятивно и могут быть в свою очередь рассмотрены логико-предметно. Эта релятивность позволяет наряду с открыто-замкнутыми системами говорить также и об открыто-замкнутых средах как средах существования ОЗС. Центральное место в целостном рассмотрении любой ОЗСР занимает наряду с ее замкнутым ядром (логикой среды, макросредой) и открытой системой возможных предметных продолжений ядра (микросредой) индуцированное относительно автономизацией макро и микросред ОЗСР прагматико-обусловленное их логико-предметное отношение (ЛПО). Последнее есть бинарное отношение, которое в связи с упомянутой релятивностью логики и предмета среды естественно рассматривать как рефлексивное, транзитивное и антисимметричное, т.е. как частичный порядок.

Сказанное выше позволяет содержательно разъяснить природу ОЗСР как прагматико-обусловленное логико-предметное отношение над ее макро- и микросредами. Такая трактовка, очевидно, обогащает понятия открыто-замкнутой системы, делая возможным исследование его в контексте ОЗСР. Как было показано в [3], универсальным средством изучения сущностей, в частности и ОЗС, является прагматико-обусловленная типизация (ТОП) универсума сущностей (УС). Она, как известно, сводится к прагматикомотивированным введениям и исключениям абстракций в УС как *непротиворечивой логической абстракции целостного многообразия сущностей*, в частности за счет использования средств актуализации и потенциализации [3]. В случае открыто-замкнутых сред ТОП означает прагматико-обусловленную индивидуализацию в ОЗСР как среде существования ОЗС важных типов открыто-замкнутых систем. Такая индивидуализация может быть как непосредственной, так и опосредованной. Объектом применения первой является непосредственно ЛПО обогащаемой ОЗСР. Вторая же влияет на ЛПО опосредованно через прагматико-обусловленные индивидуализации в макро- и микросредах ОЗСР. Результаты таких индивидуализаций как сущности могут трактоваться биабстрактно. С одной стороны, в контексте типизируемой ОЗСР их можно рассматривать как существующие в открыто-замкнутой среде ОЗС. С другой, ввиду упомянутой логико-предметной релятивности рассмотрений каждая такая ОЗС может быть в свою очередь рассмотрена как некоторая ОЗСР. Не исключается, что ОЗСР может быть средой существования единственной ОЗС, а также не исключает

ется случай «пустой» ОЗСР. В целом, необходимо отметить, что ОЗС и ОЗСР представляют собой принципиально разные типы абстракции, которые взаимно несводимы, однако, при этом дополняют друг друга в целостных рассмотрениях сущностей.

Таким образом, в первом приближении любая ОЗСР может представляться как взаимодополнение существующих в ней ОЗС. Концептуальную основу этого взаимодополнения составляют упомянутые введения и исключения абстракции в ОЗСР. В свою очередь, любую ОЗС в контексте сказанного совершенно естественно трактовать как результат ТОП соответствующей ОЗСР. Их взаимодополнение — основа биабстрактного подхода к изучению сущностей, развиваемого в теории дескриптивных сред (ДС) [6]. Заметим, что отличие типов абстракции ОЗСР и ОЗС не просто декларируется, а естественно реализуется здесь в виде принципиально разного использования их в целостных рассмотрениях. Так, с точки зрения ОЗСР, сущность — это инструмент, поддерживающий активную роль субъекта — *проявлять* (сущности). Например, может рассматриваться как экзистон [7, 8], *т.е. как вид существования* (многих) *сущностей* (ОЗС). Та же сущность, трактуемая как ОЗС, поддерживает пассивную, в деятельности субъекта, роль результата проявления, в этом смысле *проявляется* субъектом. В частности, рассматривается уже как актуальная сущность — представитель некоторой ОЗСР (содержательно говоря, ее прагматико-обусловленное «оракульное» замыкание).

В контексте сказанного, важно отметить, что, не смотря на то, что важнейшими средствами осуществления любых типизаций являются введения и исключения абстракции, тем не менее, они не могут рассматриваться как самодостаточные в познании сущностей как предметов изучения. При всем пиетете к этим средствам, они всего лишь инструмент. Суть же использования его в каждом конкретном рассмотрении сущности состоит в прагматико-обусловленном (следовательно, субъективном) применении этого инструмента для обогащения изучаемого предмета. Ведь именно достаточно богатое и вместе с тем не обремененное спецификой обогащение (т.е. лейбницево обогащение, в соответствии с терминологией [5–8]) предмета исследований (а не обобщение его или конкретизация) — есть центральное звено любого рассмотрения.

В этой связи, хотелось бы обратить внимание на принципиальное различие обобщений и конкретизаций рассмотрений, с одной стороны и обогащений их, с другой. Ведь хотя обобщение и есть важнейшим инструментом познания, догматизировать его, а тем более делать основной целью любого исследования не стоит. Следование по этому пути, очевидно, приводит к тому, что основной предмет изучения становится всего лишь «трамплином» для достижения более высокого уровня общности рассмотрения. При этом основной предмет, фактически остается вне рассмотрений, хотя именно его обогащению должно было бы быть подчинено проведенное обобщение. А вновь вскрытый уровень общности трактуется как новый самодостаточный предмет рассмотрений. Последний, вследствие известного закона об обратном соответствии объема понятия и его содержания, очевидно менее богат по сравнению с исходным. Очевидно, что такая практика, в контексте сказанного, слабо вяжется с процессом познания. Чаще всего такой подход свидетельствует о недостаточной прагматической мотивированности изначального выбора предмета изучения. Проводя данную стратегию, не

вполне абсурдным видится обобщать предмет любого рассмотрения, например, до понятия сущности или даже до *нечто*, как наиболее общего, включающего в себя все и вся (например, в понимании [6–8]). Это максимально обобщит рассмотрение. Однако платой будет чрезвычайно малая его содержательность, совладать с которой, как отмечал Ч. Пирс (см. [11], т.2, с. 72) «... попросту недостает сил». Не менее «полезным» видится и применение конкретизаций как исключений абстракций предмета рассмотрения ради них самих. В частности, в логических рассмотрениях точка зрения «все есть прикладная логика» приводит к смещению акцентов с изучения любой сущности как обогащения, в частности конкретизации, замыкания единой логики изучаемого предмета, к рассмотрению серии прикладных логик как результатов, зачастую слабо мотивированных, конкретизаций первой.

Думается, что все изложенное в достаточной степени демонстрирует принципиальность ролей ОЗСР и ОЗС в рассмотрении сущностей. ОЗСР представляет собой, прежде всего инструмент изучения сущностей как ОЗС. В этом смысле, такие среды поддерживают индукто-дедуктивные методы исследований посредством логико-предметного взаимодополнения замкнутой логики (макросреды) и открытой системы предметных микросред. Роль ОЗС в этом тандеме — результат применения ОЗСР в рамках дедуктивного (замкнутого в текущей детализации) рассмотрения исследуемой сущности.

Хотя ОЗСР и ОЗС представляют собой важнейшие абстракции в изучении сущностей, ограничиться только ими нельзя. Ведь как видно из вышесказанного, не столько важны ОЗС и ОЗСР сами по себе, сколько их взаимодополнение. Во вскрытии природы последнего роль ЛПО, очевидно ключевая. Ввиду этого раскрытие сути логико-предметных отношений в контексте ОЗСР и ОЗС является предметом этой работы.

## ЛОГИКО-ПРЕДМЕТНЫЕ ОТНОШЕНИЯ В ПЕРВОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

О том, что ТОП — универсальное средство познания сущностей было обстоятельно изложено, например, в [3–8]. Целью любого применения ТОП, как следует из вышесказанного, является обогащение предмета исследования путем индивидуализации связанных с ним тех или иных прагматико-обусловленных типов сущностей. Роль ЛПО в этом процессе обогащения ключевая.

Логико-предметное отношение — весьма многоаспектное и, как следствие, недостаточно содержательное понятие. Следовательно, нуждается в прагматико-обусловленном обогащении. Прагматика данной работы состоит в исследовании процессов дескриптивирования сущностей типа бизнес-процессов в предметных областях. Поэтому здесь ограничимся отдельными, обусловленными указанной прагматикой рассмотрения, видами рода ЛПО. Это позволит прагматико-обусловленным образом существенно обогатить рассмотрение ЛПО в целом.

В [12–14] дан обстоятельный обзор сред интеграции (ИСР). В соответствии с ним, любая ИСР представляет собой прагматико-обусловленное обогащение ОЗСР, основу которого составляет индивидуализация среди ЛПО таких логико-предметных отношений, которые индуцированы оркульными или параметрическими системами [14]. Интеграционная точка

зрения на сущность как на систему с параметрами сегодня является наиболее продвинутой и превалирует в строгих рассмотрениях. Поэтому обогащение ОЗСР посредством экспликативного сведения ЛПО к оракульным ЛПО здесь является прагматико-обусловленным или лейбницевым [4–7]. В дальнейшем, если специально не оговорено иное, термин ЛПО, а следовательно и ОЗСР и ОЗС будем понимать именно в таком смысле.

Из сказанного выше следует, что хотя макросреда, микросреда и ЛПО кардинально и обогащают представление об ОЗСР и ОЗС, взаимосвязи этих понятий и их роли в процессе познания в целом, тем не менее, их изучение не может быть сведено исключительно к автономным исследованиям этих понятий. В контексте сказанного выше, очевидно, что они важны, но не столько сами по себе, сколько важно их взаимодействие. Чтобы вскрыть природу последнего необходимо, по крайней мере, на содержательном уровне понять принципиальность ролей макро-, микросред и ЛПО в ОЗСР и ОЗС.

### ПРИРОДА ВЗАИМОДОПОЛНЕНИЯ МАКРО-, МИКРОСРЕД И ЛПО.

В [3–7] было показано, что исследование любой сущности может рассматриваться как пошаговое прагматико-обусловленное обогащение предмета изучения. Универсальным средством такого обогащения, как отмечалось, например, в [3] выступает ТОП. Подход ОС-System [4–7] существенно обогащает наше представление о природе ТОП. Суть его в первом приближении сводится к тому, что любые обогащения изучаемой сущности рассматриваются в контексте взаимодействия поддерживающих процесс изучения ОЗСР и ОЗС (например, поддерживающих генезис предмета изучения). Причем доминантой в нем, очевидно, выступает именно ОЗС, как поддерживающая динамику результата процесса. Это означает, что в ОС-System (абсолютно) превалирует обстоятельно мотивированная, например, в [6, 8, 12, 13] точка зрения на предмет изучения как на ОЗС. В [6] она зафиксирована в виде тезиса открыто-замкнутости: «Сущность суть ОЗС». Необходимо отметить, что такая расстановка акцентов есть первым прагматико-обусловленным (лейбницевым) шагом обогащения всякой исследуемой сущности. Схематически сказанное может быть проиллюстрировано на рис. 1.

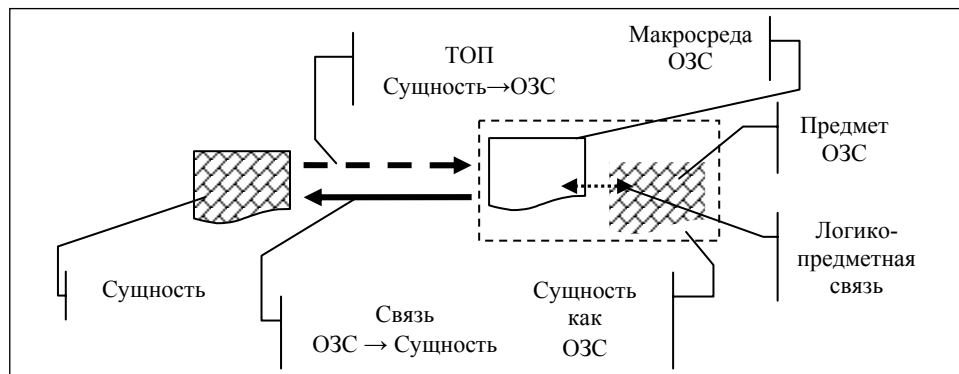


Рис. 1. ТОП: введение абстракции ОЗС

Отметим, что пунктир в обозначении стрелки ТОП «Сущность→ОЗС» применен, чтобы отразить «подчиненность» роли ОЗС индуцировавшей ее сущности. Сплошная стрелка «Связь „ОЗС→Сущность”» должна подчеркнуть значимость принципа обратимости [6] в исследованиях, проводимых в рамках ОС-System.

Достигнутый благодаря проведенному обогащению уровень содержательности рассмотрения сущности явно недостаточен. Ряд последующих шагов ТОП в первую очередь связан с опосредованными обогащениями сущности. Т.е. сущности обогащаются не непосредственно, а через обогащение соответствующей ОЗС и (или) приведенного выше взаимодействия сущности и ее ОЗС. В этой связи совершенно естественно всплывает вопрос о соответствующей рассмотрением ОЗСР. Таким образом, приходим к следующей, обогащенной схеме ТОП (рис. 2).

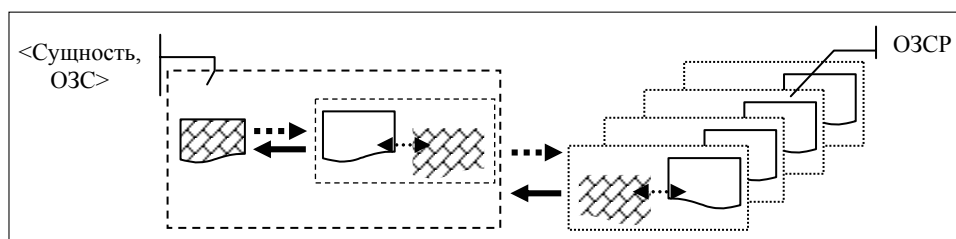


Рис. 2. ТОП: введение абстракции ОЗСР

Здесь, как и на рис. 1 пунктир в обозначении стрелки ТОП «<Сущность, ОЗС>→ОЗСР» отражает «подчиненность» роли ОЗСР индуцировавшему ее биполю <Сущность, ОЗС>, а сплошная стрелка подчеркивает значимость принципа обратимости в ОС-System.

Хотя в проведенном построении этой системы обогащений «движение» осуществлялось «от конкретного к абстрактному», тем не менее, наличие стрелок, как в прямом (от конкретного к абстрактному), так и в обратном (от абстрактного к конкретному) направлении указывает, что обогащения не только могут, но и, как правило, носят двунаправленный и даже смешанный характер. Это, в свою очередь, позволяет совершенно естественно перейти в открыто-замкнутых (в этом смысле биабстрактных) рассмотрениях от традиционных для моноабстрактных платформ уровней абстракции к типам абстракций. Важность этого перехода для рассмотрения проблематики ИТС обстоятельно обоснована, например в [4–8].

Необходимо отметить, что роль введенных обогащений ключевая для вскрытия природы ТОП. Ведь ТОП это прежде всего сущность и значит, она как и любая иная сущность, может быть рассмотрена с позиции ОС-System. Значимость триады <Сущность, ОЗС, ОЗСР> состоит в том, что она образует замкнутое ядро или макросреду ТОП как открыто-замкнутой среды прагматико-обусловленных обогащений сущностей. Другими словами только эти обогащения являются общезначимыми для ТОП в ОС-System и в этом смысле задают логику этой среды.

Вскрытие логики ТОП существенно обогащает сущностные рассмотрения в рамках ОС-System. При этом важно подчеркнуть, что данное обогащение является лейбницевым не только в контексте рассмотрения сущностей, но и природы ТОП. Однако содержательность его все еще

недостаточна. Дальнейшие обогащения должны быть по необходимости перенесены в предмет. С точки зрения сущностных рассмотрений эти шаги направлены на прагматико-обусловленное вскрытие ОЗСР рассматриваемой сущности, т.е. на наполнение конкретным содержанием ее макро-, микросред и ЛПО. Что же касается ТОП, то данное обогащение наполняет конкретным содержанием, в первую очередь, микросреду соответствующей ОЗСР. Отметим, что ее макросреду составляет вскрытая выше логика ТОП, а ЛПО этой среды — вскрытая выше структура ОЗСР как взаимодополнение макро-, микросред и ЛПО.

### ОБОГАЩЕНИЕ ПРЕДМЕТА РАССМОТРЕНИЯ

Дальнейшие шаги ТОП связаны, как это было отмечено с наполнением конкретным содержанием составляющих ОЗСР, т.е. ее макро-, микросред и их логико-предметного взаимодействия. Эта задача, в отличие от рассмотренных выше, по необходимости жестко ориентирована на предмет рассмотрения. В этом смысле ее решение прагматико-обусловленно обогащает вскрытую выше логику ТОП, увязывая ее с предметом рассмотрения — изучаемой конкретной сущностью.

Следует отметить, что речь в данном случае идет именно о предметном обогащении вскрытой выше логики ТОП, а не о построении так называемой предметной логики. Это означает, что полученное обогащение логики есть новым типом абстракции, сущностью, которую можно в свою очередь изучать при помощи ТОП. Однако этот новый тип абстракции вовсе не обязательно является общезначимым. Напротив, наделение его этой чертой ничем не обусловлено и, следовательно, не является лейбницевым обогащением. Ведь предметные обогащения логики могут нести в себе не только неопределенности, но даже и скрытые противоречия, подобные хорошо известным парадоксам теоретико-множественной платформы. Возведение же их в ранг общезначимостей не только нецелесообразно, но недопустимо.

По аналогии с вышеизложенным, сказанное продемонстрируем ниже следующей диаграммой (рис. 3).

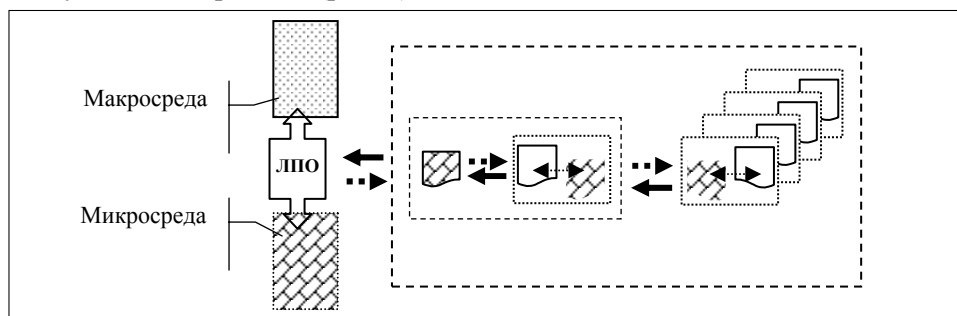


Рис. 3. ТОП: индивидуализация макро-, микросред и ЛПО

Значимость этого шага ТОП состоит в том, что в его результате, хотя и опосредованно, но вместе с тем достаточно четко прослеживается связь с предметом рассмотрения — изучаемой сущностью. Ведь полученное обогащение представляет собой прагматико-обусловленную ОЗСР, в которой упомянутая сущность может рассматриваться, как существующая в ней

некоторая ОЗС. Другими словами, этим эксплицирован инструмент адекватного рассмотрения изучаемой сущности в рамках ОС-System.

При этом адекватность полученной ОЗСР как средства изучения конкретной сущности не следует понимать абсолютно. Это означает, что данная ОЗСР получена в результате лейбницевого процесса как пошаговости лейбницевых обогащений. Но она как сущность может быть подвергнута дальнейшим аналогичным обогащениям при условии, что последние прагматико-обусловлены. То же относится и к результатам применения ОЗСР как средства изучения сущностей.

Наконец, рассмотрим этап связанный с индивидуализацией в ОЗСР соответствующей прагматике рассмотрения ОЗС. Он представляет собой пошаговый процесс непосредственных и опосредованных лейбницевых обогащений рассмотрений посредством различных прагматико-обусловленных введений и исключений абстракций. Касаются они макро-, микросред и ЛПО ОЗСР. Основным инструментом здесь выступают средства актуализации и потенциализации названных сущностей. Выше они, на общем уровне, были достаточно подробно рассмотрены. В данном же контексте особую значимость для дальнейшего изложения имеет актуализация ЛПО ОЗСР в смысле замыкания этой среды до конкретной прагматико-обусловленной ОЗС — среды интеграции, представляющей (презентующей) исследуемую сущность, так как это реально обогащает рассмотрение принципиально новым качеством. Сказанное представлено на диаграмме (рис. 4).

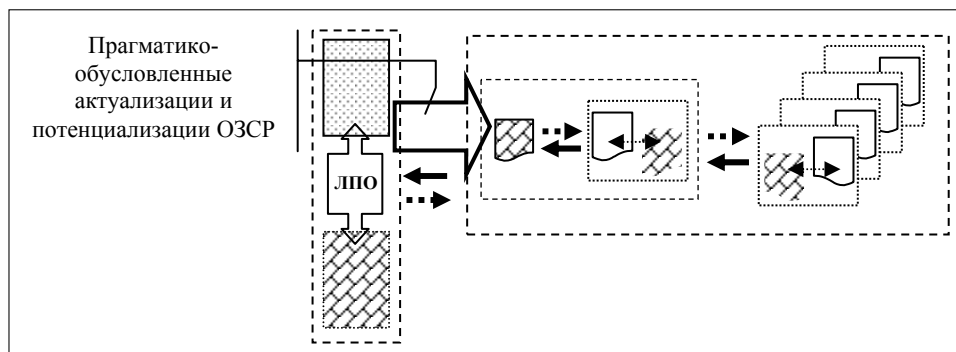


Рис. 4. ТОП: актуализация ЛПО ОЗСР до конкретной ОЗС-модели исследуемой сущности

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные выше шаги ТОП показывают, что любые проблемы, в частности и репрезентативные для прагматики ИТС, по необходимости сопряжены с двумя принципиально несводимыми друг к другу типами абстракции сущностей — процессами и ассоциированными с ними результатами. Причем эти типы важны, но не столько сами по себе, сколько в их взаимодополнении. Поэтому очевидно, что адекватные рассмотрения такого сорта проблем должны носить биабстрактный характер. Природа упомянутого взаимодополнения типов абстракции обусловлена, как уже ранее отмечалось, взаимодействием связанных с любым процессом активной и пассивной его составляющих. Рассмотренный в работе подход к исследованию ИТС



с позиции ОС-System позволяет, в отличие от традиционных моноабстрактных подходов, адекватным образом вовлечь в рассмотрение упомянутое активно-пассивное взаимодействие на уровне биполя <ОЗСР, ОЗС>. Тем самым реально, а не номинально поддерживает взаимодополнение процессов решения информатико-технологических проблем с их результатами.

В данной работе как сами понятия ОЗСР, ОЗС, ИСР, ИС, так и их логико-предметное взаимодополнение рассмотрены с позиции учета их наиболее общих свойств, характеристик. В этом смысле они являются ключевыми оракулами рассмотрения как открыто-замкнутой среды. Значимость их, прежде всего, в том, что они как носители логики рассмотрения естественным образом поддерживают ее различные предметные обогащения. А именно это является, как следует их вышесказанного ключевым атрибутом рассмотрения в рамках концепции ОС-System. Вскрытие природы таких обогащений и рассмотрение репрезентативных примеров будет приведено в работе «Открыто-замкнутые основания интеграционных сред II», которая является естественным предметным продолжением изложенного.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дейкстра Э. Дисциплина программирования. — М.: «Мир», 1978. — 275 с.
2. Вибрані питання програмології. Праці наукового семінару «Програмологія та її застосування». — Київ: Науковий світ, 2007. — 183 с.
3. Редько В.Н., Редько И.В., Гришко Н.В. Deskриптивныe системы: концептуальный базис // Проблемы программирования. — 2006. — № 2–3. — С. 75–80.
4. Редько И.В. Экзистенциальный базис deskриптивных сред // Проблемы программирования. — 2008. — №1–2. — С. 15–24.
5. Редько И.В. Экзистенциальный базис сущностных сред // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2008. — № 3. — С. 16–31.
6. Редько И.В. Теория deskриптивных сред и ее применения // Докт. дисерт. — Київ: НТУУ «КПІ». — 2008. — 403 с.
7. Deskриптивныe аспекты системного подхода // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2005. — № 3. — С. 7–28.
8. Редько В.Н., Редько И.В. Экзистенциальные основания композиционной парадигмы // Кибернетика и системный анализ. — 2008. — № 2. — С. 3–12.
9. Роджерс Х. Теория рекурсивных функций и эффективная вычислимость. — М.: Мир, 1972. — 624 с.
10. Мальцев А.И. Алгоритмы и рекурсивные функции. — М.: Наука, 1965. — 391 с.
11. Пирс Ч.С. Принципы философии. — СПб.: Санкт-Петербургское философское общество, 2001. — Т. 2. — 320 с.
12. Редько И.В. Експлікативне моделювання середовищ інтеграції // Наукові записки НАУКМА. — Т. 16: Комп'ютерні науки. — 1999. — С. 30–35.
13. Редько И.В. Процесологічні аспекти середовища моделювання // Наукові записки НАУКМА. — Т. 21: Комп'ютерні науки. — 2003. — С. 38–50.
14. Редько И.В. Экспликативное моделирование в среде интеграции // Вестн. междунар. Соломонова ун-та. — 2000. — № 4. — С. 92–102.

Поступила 20.04.2010

## **EXTERNAL COST AS AN INDICATOR FOR SUSTAINABLE ELECTRICITY GENERATION SYSTEM**

**Y. MATSUKI, O. BRONDZIA, O. MASLYUKIVSKA**

This research applies the Impact Pathway Approach [1] for identifying the external cost for the fossil-fuel electricity production in Ukraine. Using the SimPact Computer Code and Willingness to Pay survey, it calculates the external costs of the morbidity and mortality of population due to the air pollutants emitted from an electricity generation plant using as an example Triypilska Electric Power Generation Plant in Ukrainka town. Based on the research results there were made recommendations to include the external costs into the price of electricity in Ukraine generated from the fossil fuel combustion.

### **INTRODUCTION**

Ukraine is one of the countries where industries play the significant role in its economic developments. Among various industries, the energy sector takes an important role, to satisfy not only the demands for energy in Ukraine, but also the demands from the other European countries. However, when talking about energy production, nobody should ignore the fact that this activity is exactly the source of harmful emissions into the atmosphere.

Considerable fraction of all the emissions is being generated during the process of fossil fuel combustion, especially of coal, at fossil-fuel electricity generation stations. Today, the fossil-fuel electricity generation stations supply 45.2 percent of the total electricity in Ukraine [2], of which share is next to the nuclear power's 46.2 percent. However, the facilities and the equipments of power stations are in insufficient conditions. About 40 percent of the facilities/equipments need to be replaced because they were built in the 1950s, and their working periods have already expired [3].

The National Inventory of anthropogenic emissions in Ukraine reports that the sector of energy production emits the largest amount of greenhouse gases among the other industrial sectors [4]. Also, at the same time, the process of energy production leads to the emissions of total suspended particles (TSP), sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>) and nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>).

Total suspended particles are the air pollutants which can be divided into two types by their aerodynamic diameters: PM<sub>10</sub> (aerodynamic diameter is less than 10 μm) and PM<sub>2.5</sub> (aerodynamic diameter is less than 2.5 μm). These particles are especially harmful to the human health because particles can penetrate the human organism, such as respiratory system, owing to their small sizes. At the same time, they cause illnesses of cardio-vascular system, which can end with mortality cases, among people who live in the industrial centers near the power stations [5].

However, the same impacts are also observed in the energy production sector of the United States and the EU countries [5–7]. These countries have already developed the methodology to assess the health impacts of air pollutions, and to

evaluate the monetary values of those health impacts (damage costs), including the method to assess the values of the deaths after years from the exposures to the pollutants [8–9]. The results of those studies in the US and in the EU show that the monetary values (damage costs) of the health impacts caused by the pollutions are significantly large [1, 8]. Considering the evaluated health impacts and the damage costs in the US and in the EU, it is assumed that the processes of the energy production in Ukraine also cause the considerable size of the impacts and the damage costs, hence the external costs of human health.

## **IDENTIFICATION OF THE PROCEDURE**

In order to identify the necessary procedure to assess the size of the health impacts and the external costs of human health in Ukraine, the following topics were investigated.

1. **External cost assessment.** The supply and utilization of energy impose risks and damages to a wide range of receptors, including human health, natural ecosystems, and the built environment. Such damages are not accounted for the costs in the decisions making on electricity generation; therefore, they are external costs [10]. The external costs of the electricity generation systems are the costs imposed on society and the environment that are not accounted for by the producers and consumers of energy, i.e. that is not included in the market price [8]. Traditional economic assessment of electricity generation systems has tended to ignore these costs.

2. **Development of the methods.** Since the early 1990s, the results of several major studies have been published on environmental impacts and resulting external costs; and, through these studies, the consistent framework for the quantification of the energy related external costs was formulated; among them there were the EC funded ExternE study [8, 11–17], the study on External Costs of Fuel Cycles of the US Department of Energy [18–25], and the New York Study [26–31].

There are two approaches used for the assessment of health impacts and the external costs of air pollutions emitted from the power plants: the top-down approach and the bottom-up approach. In the top-down approach, generic damage costs are estimated at the national level for various types of impact and are then ascribed to registered emissions of pollutants in order to determine an average external cost per unit of emission. Usually, this method requires highly aggregated data for emissions and damages they cause [32]. The bottom-up approach, known as the Impact Pathway Approach, is supposed to measure impacts of the energy generation systems through step-by-step analysis, starting from emissions and completing with economic valuation of the damages to health and environment. The procedure starts from the identification of the pollutants from the plants, the assessment of atmospheric dispersion of the pollutants, the estimation of the ground concentration of the pollutants, the estimation of various health impacts on the ground, and the estimation of the monetary values of those health impacts. Together with the US EPA guideline [33], many of the studies carried out in the US and in the EU [1, 8, 11–25] used the Impact Pathway Approach, and reported the results with the normalized monetary value of the damages, i.e. the damage cost in US dollars per unit electricity generation, US dollars/kWh, to further compare the results with the price of electricity.

Later, the methodology was published by the International Atomic Energy Agency as the guideline document [34], and also a computer code, EcoSense, was developed by Stuttgart University and used in the ExternE project of the European Commission. In the guideline document [34], it was forecasted that a simplified computer code would be developed because there had been enough number of reports published in the United States and in the European Union, to find what parameters are more influential than others. And then, the SimPact Computer Code [35] was developed. With this Computer Code, the possibility of calculating the health impacts and the damage costs of air pollution increased, also in Ukraine; however, there has not been any published report on the case study of this topic in Ukraine.

**3. Assessment of the health impacts.** The method of estimating the health impacts from the ground concentration have also been published in several major reports, including Rabl [9] and Wilson and Spengler [36]. These publications define the factors that are to be multiplied with the ground concentration levels, to get the number of the cases of different types of the health impacts. Among them, Pope et al. [5] and Dockery et al. [6] reported the positive correlations between the exposure to particles and the total mortality. And then, the methodology to estimate the mortalities several years after the exposure to the air pollutants, the long-term mortality, were developed [8].

Almost all of the currently available epidemiological studies of air pollution fall into two classifications of studies, which include:

- acute exposure studies that are typically time-series studies and use short term changes in air pollution over time (usually 1–5 days) as the source of exposure variability;
- chronic exposure studies which use longer-term pollution data (usually one year or even more) [36].

The primary pollutants from the fossil-fuel electricity generation stations are  $PM_{10}$ ,  $SO_2$  and  $NO_x$  [9], but there are also the secondary pollutants that are to be chemically transformed from the primary pollutants after the emission into the air. The SimPact Code [37] assumes that the nitrates and the sulfates are to be formulated only beyond 50 km radius from the emission source, causing different types of health impacts from those of the primary pollutants. Table 1 shows the types of the health impacts due to the air pollutants.

**4. Assessment of the damage costs.** The necessity to estimate the damage cost for the long-term mortality led to the method, including the technique to survey the people's Willingness to Pay (WTP) for the prolongation of human life [38] and the technique to calculate the unit cost of the long-term mortality, which takes into account the discount-rate for a long period from the present time [39].

The unit costs to calculate the other types of health impacts are also reported in ExternE [17]. Those unit costs such as in Rabl [9] are the values in the EU countries, but the method to estimate the country specific unit costs in non-EU countries was also reported by Markandya [40] that is included in the IAEA's SimPact Computer Code by Spadaro [35], which is called the Benefit Transfer Model that considers the ratio of the Purchasing Power Parity Gross National Product (PPP GNP) of the EU and the non-EU countries. About the unit cost of Ukraine, it is reported that the methodology developed by the US EPA and adjusted in Russia for Eastern European transition countries was used for the assessment of the air pollution costs from  $PM_{2.5}$  in Ukraine [41].

**5. The Power Station.** Under the framework of this research, the assessment was performed for the Trypilska Power Station. This power station is located in Kyiv region, in Ukrainka town, which is 36 kilometers from Kyiv to the south. There are several reasons for choosing Trypilska Power Station to be a theme of this research. First of all, it is the power station with a big size of energy production capacity in Ukraine (1800 MWt), besides, it supplies energy to three regions of Ukraine: Kyiv, Zhytomyr, and Cherkasy. Secondly, according to the National report of Kyiv region in 2006, the Trypilska thermoelectric power station, which is the biggest industrial object in Kyiv region, located about in the center of Ukraine, is the main source of emissions in the whole region [42].

## **METHODOLOGY**

As described in above section, there are two approaches used for the assessment: the top-down and the bottom-up approaches. For this study, the bottom up approach is appropriate to take, because this is the common approach used in the recent studies on the health impacts and the damage costs in the US and in the EU ([1, 8, 11–31]); and, because, by using this approach, each step of the procedure and the input data can be examined for the case study in Ukraine.

The bottom-up approach, known as the Impact Pathway Approach, is supposed to measure impacts of the electricity generation systems through step-by-step analysis, starting from emissions and completing with economic valuation of the damage costs. The main idea of the Impact Pathway Approach is a logical way of quantifying the damage costs, which results in the observation of the whole process of the electricity generation activities, emitted pollutants, their ambient concentrations and their incremental impacts on the environment and people's health, and, at last, monetary valuation of such impacts. In the case of pollutants, the approach begins with determining the quantity of emissions from a defined source, and then makes use of dispersion models and dose–response functions to determine the marginal damages resulting from the emissions. The final step consists of multiplying the marginal damages by their estimated unit monetary value. The approach is site specific and the marginal external costs obtained are in principle not transferable [32]. In order to measure impacts of fuel use on the health, the Impact Pathway Approach is being widely used in Europe and North America as the main approach of the external cost assessment.

The first step of the analysis is to identify the amount and the types of air pollutants, which are specific to the concerned power station. In this study, the primary pollutants are PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub>, which lead to different types of morbidities and mortalities.

The second step is to measure atmospheric dispersion. The local and the regional dispersion models are used to account for all significant damages. Local domain is a territory up to 50 km around from the source of emissions, whereas regional domain covers larger territory which expands up to 1000 km from the emission source [35]. In this study, the atmospheric dispersion was calculated by two different models for these two different dispersion ranges, as shown by formulas 1 and 2. In this study, Gaussian plume model was used for estimating the

ground concentrations within the local domain (up to 50 km radius), and the Uniform World Model was used within the regional domain (from 50 km to 1000 km radius) in the SimPact Computer Code [35]. The outlines of these two models are shown by formulas 1 and 2.

Simplified Gaussian plume model for the local domain of less than 50 km [35]:

$$\frac{C}{Q} \Big|_{\text{LOCAL}} = \left[ \frac{1}{\pi u \sigma_Y \sigma_Z} \right] e^{-\left(\frac{y}{\sqrt{2}\sigma_Y}\right)^2} e^{-\left(\frac{h_E}{\sqrt{2}\sigma_Z}\right)^2}, \quad (1)$$

where,  $C$  — the concentration of pollutant in quantity per unit volume ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ );  $Q$  — the quantity emitted per unit time by a chimney stack considered to be at the origin or coordinates;  $\sigma_Z$  — the standard deviation of the normal distribution densities in the vertical dispersion, depends upon the atmospheric stability (m);  $\sigma_Y$  — standard deviation in the horizontal dispersion, depends upon the atmospheric stability (m);  $u$  — wind speed (m/s);  $x$  — distance from the source of emission (m);  $y$  — height from the ground (m);  $h_E$  — the height of the plume, not simply the stack height because hot gases usually make the plume rise even after leaving the stack, although adverse meteorological conditions can cause downwash (m).

Uniform World Model for regional domain from 50 km to about 1000 km [35]:

$$\frac{C}{Q} \Big|_{\text{REGIONAL}} = \left( \frac{1}{2\pi u h_{\text{MIX}}} \right) \frac{1}{r} e^{-\left(\frac{k_{\text{UNI}}}{u h_{\text{MIX}}}\right) r}, \quad (2)$$

where,  $h_{\text{MIX}}$  — a mixing layer height, in which the atmospheric dispersion occurs (m);  $r$  — radius from the emission source (m);  $k_{\text{UNI}}$  — depletion velocity (m/s);  $u$  — an average wind speed (m/s).

During this study, in order to estimate the health impacts from the air pollutants emitted from the Trypilska Power Station, the list of Exposure-Response Factors (ERF) was used, as shown in Table 1. These factors are to be multiplied by the ground concentration to calculate the health impacts. PM10 Restricted Activity Days is from ExternE 1998 [17], and the others are from Rabl 2001 [44]. The Exposure-Response Factors of these two references are based on the studies of health impacts from the air pollutions that were started after Dockery et al. 1993 [6] found the correlation between the air pollutions and the health impacts. The correlations are assumed as the linear functions.

The next step is to calculate the health impact caused by increased ambient concentrations of the pollutants [34]. Impacts are estimated by the dose-response function, also known as the concentration-response or the Exposure-Response Factor (ERF) [43]. The ERF is concerned about the quantity of the pollutant that affects a receptor (for example, population) to the physical impact on the receptor (for example, the number of the hospital admissions). It was assumed that the human body of average Ukrainian is as same as average European, and then the ERF used for the European case studies [17, 44] was used for the case study in Ukraine.

**Table 1.** Exposure-Response Factors to calculate the health impacts [17, 44]

Range	Health Impact	Cases/ $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Local Range (<50 km radius) and Regional Range (from 50 to about 1000 km)	PM10 long-term mortality	$2.600 \times 10^{-4}$
	PM10 Chronic Bronchitis	$5,855 \times 10^{-5}$
	PM10 Restricted Activity Days	$2.500 \times 10^{-2}$
	NOx Chronic Bronchitis	$5.055 \times 10^{-5}$
	SO <sub>2</sub> Short-term Mortality	$2.300 \times 10^{-6}$
	PM10 Bronchodilator Use	$1.404 \times 10^{-3}$
	PM10 Lower Reparatory Symptoms	$3.750 \times 10^{-3}$
Regional Range (from 50 to about 1000 km)	Nitrates Cardiovascular Hospital Admission	$8.400 \times 10^{-4}$
	Sulfates Long-term Mortality	$4.342 \times 10^{-4}$
	Nitrates Long-term Mortality	$2.600 \times 10^{-4}$
	Sulfates Chronic Bronchitis	$9.778 \times 10^{-5}$
	Nitrates Chronic Bronchitis	$5.055 \times 10^{-5}$
	Nitrates Respiratory Hospital Admission	$2.840 \times 10^{-6}$
	Sulfates Respiratory Hospital Admission	$4.743 \times 10^{-6}$

#### METHOD FOR MONETERY VALUATION

The damage costs are to be calculated from the health impacts that should have been calculated in the previous step, by multiplying the unit cost of each mortality or morbidity with the number of cases of the mortality or morbidity. In this case study, the results are shown with the unit costs used in the other case studies carried out in the EU [17, 44], and with the unit costs with Ukrainian value, which were evaluated by the contingent valuation for the monetary values of the long-term mortalities, and by the Benefit Transfer Model [40] for the other health impacts. Contingent Valuation is the general expression of evaluating people's willingness to pay for their life, by setting a hypothetical market condition that doesn't exist. The estimated monetary values are to be obtained through the interview process.

For monetary valuation of the long-term mortalities caused by the air pollutions, such as PM10, nitrates and sulfates, the contingent valuation was used to assess the Willingness to Pay (WTP) and to evaluate the unit cost. This method provides the values of the environment goods, such as clean air, clean water, and quiet environment, based on the individual preferences in terms of the willingness to pay (WTP) for the improvement of the quality of the environment, or by the willingness to accept the current cost of the environment [38].

In this research, the WTP Questionnaire developed during 2005–2006 by the team of European experts headed by Rabl [38] was used. This questionnaire presents an innovative approach of the valuation because it is based directly on the change of life expectancy (LE), in contrast to the previous valuations of air pollution mortality that were based either on accidental deaths or on small changes in the probability of dying. The inquirer consists of four sections, which are developed in the form of questionnaire and also in the form of article about the correlation of life expectancy and air pollution. Thus, there is the information about negative influence of air pollution on human health and possible approaches that can decrease the level of the air pollution. Interviewees are supposed to mention the amount of money they are ready to pay for prolongation of their life on 3 and 6 months, in other words, they need to measure a value of increase in their life

expectancy if air pollution is reduced. So, as a result, a value of one year of life, VOLY, can be measured.

VOLY obtained by the WTP Survey can be applicable for further calculations of the values of the unit costs, which are defined as the unit damage costs for the long-term mortality.

The Benefit Transfer Model is widely used for measurement of unit damage cost of health impacts in one country through already estimated unit damage cost of health impacts in the other country. In this research, this model was used for evaluating the damage costs of various health impacts, except the long-term mortalities. In order to estimate a damage cost, an adjustment should be made to reflect differences in real income, and hence the WTP to reduce damages, between two countries [40]. Markandya recommends the following equation (3) [40] to be used for such an adjustment:

$$\text{Unit Cost in COUNTRY} = \text{Unit Cost in EU} \times \left( \frac{\text{PPP GNP}_{\text{COUNTRY}}}{\text{PPP GNP}_{\text{EU}}} \right)^\gamma, \quad (3)$$

where,  $\text{PPP GNP}_{\text{COUNTRY}}$  is the Purchasing Power Parity Gross National Product of the country normalized per capita,  $\text{PPP GNP}_{\text{EU}}$  is the average European Union Purchasing Power Parity Gross National Product normalized per capita, and  $\gamma$  is the income elasticity coefficient, which shows how the WTP value will change with the income change. As revealed by Rabl et al., if the income elasticity equals 1, the benefit transfer error is just about 36–41 % [39]. But, if income elasticity is less than 1 (e.g. 0.35, 0.40–0.60), then the transfer error is about 67–72 % [39]. In this research, it was assumed that the income elasticity is 1.

In the study, the above equation was applied for adjusting the EU unit costs to the Ukrainian unit costs. The calculated values of Ukrainian unit costs are presented in Table 2. The unit costs for the long-term mortalities by  $\text{PM}_{10}$ , nitrates and sulfates are to be estimated by the contingent valuation (WTP survey).

**Table 2.** Unit damage costs for European Union countries and estimated unit costs in Ukraine in US\$<sub>1998</sub>, by the Benefit Transfer Model

Rangle	Health Impact	EU	UKRAINE
		Unit cost (US\$/case)	Unit cost (US\$/case)
Local Range (<50 km radius) and	PM10 long-term mortality	101 000	15 600
	PM10 Chronic Bronchitis	177 800	27 462
	PM10 Restricted Activity Days	116	18
Regional Range (from 50 to about 1000 km)	SO2 Short-term Mortality	174 000	26 875
	PM10 Bronchodilator Use	42	6
	PM10 Lower Reparatory Symptoms	8	1
Regional Range (from 50 to about 1000 km)	Nitrates Cardiovascular Hospital Admission	3 420	528
	Sulfates Long-term Mortality	101 000	15 600
	Nitrates Long-term Mortality	101 000	15 600
	Sulfates Chronic Bronchitis	177 800	27 462
	Nitrates Chronic Bronchitis	177 800	27 462
	Nitrates Respiratory Hospital Admission	4 540	701
	Sulfates Respiratory Hospital Admission	4 540	701
PPP GNP (1998) in US\$[45]		20 269	3 130



## RESULTS

### 1. Input data

In order to carry out an impact assessment from electricity generation at the Trypilska Power Station, the level of emissions per year in tons, meteorological data of the region, the emission data of the power station, and number of affected population were identified. This power station is located in Kyiv region, in Ukrainka town, which is 36 kilometers from the capital city, Kyiv, to the south.

Table 3 shows the level of emissions in 2006 from the Trypilska Power Station, provided by the national report about the environment in Kyiv region in 2006 [3]. The amount of the emissions of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> were identified; however, because the air-pollution monitoring in Ukraine provides only the data of Total Suspended Particles (TSP), but not the data about the level of PM<sub>10</sub>. Therefore, the conversion factor was used to estimate the emission level of PM<sub>10</sub>. According to the US Environmental Protection Agency [33], the ratio between TSP and PM<sub>10</sub> is  $PM_{10} = 0.5TSP$

**Table 3.** Level of emissions in 2006, Trypilska Power Station [3]

Name of the pollutant	Emissions, tons/year
Total	74 605 000
Metals and their compounds	22 087
Total suspended particles (TSP):	21 951 116
PM <sub>10</sub>	10 975 560
Nitrogen compounds	11 108 921
Sulfur oxide and other sulfur compound	40 909 568
Carbon oxide	564 363

**Table 4.** Technical characteristics of the emission source [4]

Parameters	Value of parameters
Stack height, m	180
Diameter of the stack, m	9.6
Flow rate from the stack, m/s	14
Released gas temperature, K	413

Table 3 shows the technical characteristics of the emission source of the Trypilska Power Station.

After ground concentration is calculated, the health impact can be calculated by multiplying the ground concentration of pollutants by the value of the Exposure-Response Factor for each type of the pollutant (See Table 2).

Table 5 shows the input data for calculating the ground concentrations of the pollutants by atmospheric dispersion models for the local and the regional domains. The atmospheric stability D type

was assumed, as this type represents the neutral dispersion condition.

**Table 5.** Input data for the assessment in the atmospheric dispersion

Parameter	Value
Local Population Density	62.0 persons/ km <sup>2</sup>
Radius of Local Domain	56.0 km
Regional Population Density	76.9 persons/km <sup>2</sup>
Anemometer height	10.0 m
Air Temperature	285.5 degree K
Wind speed	2.62 m/sec
Atmospheric stability	D type

## 2. Willingness to Pay (WTP) survey

In order to evaluate the Willingness to Pay (WTP) for the prolongation of life for one year, the contingent valuation was carried out among Ukrainians. This research was the first time of such exploitation in Ukraine. The contingent valuation was carried out with the questionnaire developed in European Union in 2005–2006 by a team of experts headed by Ari Rabl [38]. The WTP Survey was conducted in between April and May 2008 upon 70 people in Kyiv City which is the capital of Ukraine. The aim of the research was to question Ukrainian people in order to reveal an amount of money which they are willing to pay to prolong their life. Interviews, which were carried out on one-to-one basis, in general, lasted on average about for 20 minutes. During an interview people were supposed to answer questions developed by Rabl [38] for the purpose of defining a Value of Life Year Lost (VOLY). This characteristic is especially important for the impact assessment in areas with air pollution, because it shows the amount of money in which people value one year of their life lost.

The samples were the people selected and interviewed on the streets in Kyiv, as well as the students of the National University of Kyiv-Mohyla Academy and the National Technical University «KPI». Table 6 shows the aspects of demography and socio-economics among interviewees, together with the national demography of Ukraine. This table shows that the selected samples represent the national demographic distribution of the public of Ukraine.

**Table 6.** Input data for the assessment in the atmospheric dispersion

Aspects		Interviewees	Ukraine Population[42]	
Number of observations		70	48 457 000	
Gender	Female, %	61.4	53.7	
	Male, %	38.6	46.3	
Individual's net annual income (\$ PPP)		4 510		
Average age		34.04	Workable age, % (Female:16-54/ Male:16-59)	58.0
			Older than workable age, % (Female:55/Male:60)	23.9
University education (%)		84.3	31.3	

Fig. 1 shows how the interviewed people in Kyiv are aware of air pollution and its influence on their health and the life expectancy.

Among 70 observations, 50 % of respondents replied that they are very concerned with how air pollution influences their health, 42.9 % — replied that they are somewhat concerned, 5.7 % — are not so much concerned, 0 % — is that this problem is out of their concern (not at all), 1.4 % of samples had missing answers. Therefore, it is obvious to conclude that about 90 % of people are concerned with the impact of air pollution in their living area.

The next step was to identify how many people are ready to accept a higher cost of living, therefore an increase in their daily expenses, to gain an increase in their life expectancy. It was revealed that 9 people were negative about such increase of expenses, two of them were not interested in living longer, two were negative because they believed that someone else should pay for better environment, and other five refused such a scenario of link between air pollution and life expectancy.

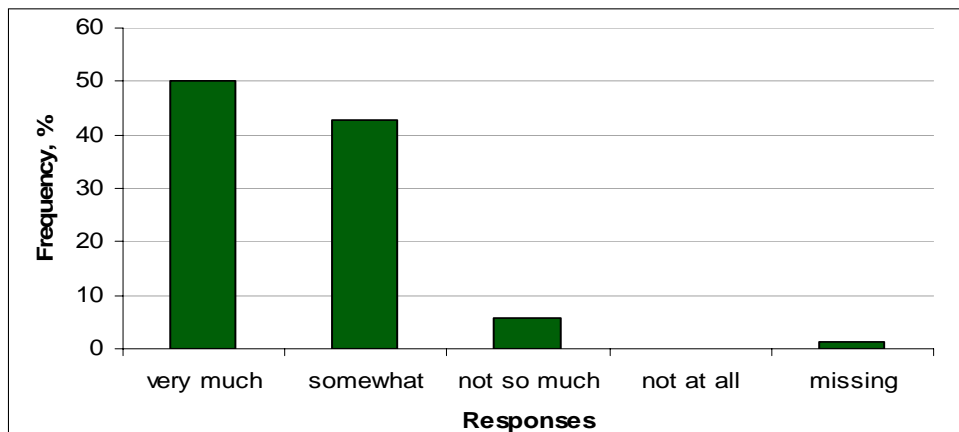


Fig. 1. Responses to Question: Are you concerned with the effects of air pollution on your health?

Out of 61 left observations, 17 samples were identified as defectives, because the willingness to pay for one year of life prolongation derived from 6 month gain and 3 month gain were not in the expected rational order. Therefore, the final VOLY for one year of life prolongation was calculated with 44 samples, from the willingness to pay for 6 month gain in life expectancy multiplied by two.

The results of this WTP survey showed that the average number of VOLY is 790 US dollars. According to the equation (4) below [39], the Value of Statistical Life (VSL), can be calculated, on the basis of which a unit cost for long-term mortality cases is measured,

$$VSL = V + \frac{V}{1+r} + \frac{V}{(1+r)^2} + \dots + \frac{V}{(1+r)^N}, \quad (4)$$

where,  $V$  is a value of one year of life lost, VOLY.  $r$  is a discount rate, because it is assumed that the VOLY will become smaller every year when seeing one's willingness to pay in one's own future at the present time. 3 percent was chosen for this calculation, as practiced in the precedent studies.  $N$  is the number of the years of a statistical human life. 37.5 years were chosen as  $N$  in this calculation, while 37 years were assumed as the total length of human life, and it was assumed that the a half of the total life length was the average life length left for the purpose of calculating the value of life after the exposure to the pollutions.

The calculated unit cost for the long-term mortality was 18.264 US dollars, and then 18.000 US dollars was chosen to calculate the damage costs of the chronic mortalities to be caused by the air pollutions from the Trypilska Power Station.

### 3. Damage cost

Table 8 shows the calculated numbers of the health impacts from energy production at the Trypilska Power Station in the local domain, which has a radius of less than 50 kilometers, and in the regional domain, which covers a territory with a radius up to about 1000 kilometers, and which covers most of the territory of Ukraine.

In the calculation for the local domain, the uniform wind direction, the uniform population density of 61.8 persons/km<sup>2</sup> for 50 km radius, and weighted av-

erage wind speed of 2.62 m/sec uniformly over all directions were assumed. For the regional domain, the population density assumed was 76.9 persons/km<sup>2</sup>. The impact assessment in regional domain also includes the impact of secondary chemical transformations of sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>) and nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), as shown as sulfates and nitrates respectively in Table 7.

**Table 7.** The distribution of health impacts in local and regional domains by SimPact Code

Pollutant	Health impact	cases/one year exposure	
		Local domain	Regional domain
PM <sub>10</sub>	Long-term mortality	14.300	954
	Chronic bronchitis	3.220	215
	Restricted Activity Days	1 374.000	91 690
	Bronchodilator use	77.200	5 149
	Lower Respiratory Symptoms	205.000	13 700
SO <sub>2</sub>	Short-term mortality	0.471	29
Sulfates	Long-term mortality	–	2 504
	Chronic bronchitis	–	564
	Respiratory hospital admission	–	27
Nitrates	Cardiovascular hospital admission	–	32
	Long-term mortality	–	992
	Chronic bronchitis	–	193
	Respiratory hospital admission	–	11

As a result, the health impact in regional domain is higher than in local domain, because regional population density is higher than local one, and the area of the regional domain is larger.

In order to assess the external cost of air pollution due to the electricity generation, the total damage costs were calculated. Assessment was made with the European Union's unit damage costs for health impacts and Ukrainian unit damage costs shown in Table 2.

The calculated total damage costs of the air pollution at the Trypilska Power Station are presented in Table 8.

**Table 8.** Total damage cost, caused by air pollution from the Trypilska Power Station, Ukrainka, Ukraine

Pollutant	Damage cost, 1000 US \$					
	With EU unit costs			With Ukrainian unit costs		
	Local domain	Regional domain	Total	Local domain	Regional domain	Total
PM <sub>10</sub>	2 179	145 456	147 635	371	24 760	25 130
SO <sub>2</sub>	82	4 983	5 065	13	770	782
Nitrates	–	134 649	134 649	–	23 180	23 180
Sulfates	–	353 324	353 324	–	60 570	60 570
TOTAL			640 673			109 662

If European unit costs are used for the calculations, the total damage cost from Trypilska Power Station is about 641 million US dollars. If the Ukrainian unit costs are used, the total damage cost is six times smaller than with European ones, and equals to about 110 million US dollars. While comparing the results of damage cost assessment separately for each pollutant, it is noticeable that damage costs of PM<sub>10</sub> in local domain and sulfates in regional domain are bigger than the

others in each domain; in the other words, PM10 and sulfates have more negative influence on human health, and, as a result, their damage costs are higher.

The average annual electricity generation at the Trypilska Power Station is 1.80 TWh [82]. Hence, a total damage cost per kilowatt-hour of electricity generation at Trypilska Power Station was calculated. Table 9 shows the damage costs per kilowatt-hour with the unit costs of the European Union and of Ukraine.

**Table 9.** Total damage cost per kilowatt-hour of electricity generation at the Trypilska Power Station

		<b>Lokal</b>	<b>Regional</b>	<b>Total</b>
Damage cost per kilowatt-hour, mUSD/kWh	EU	1.26	355	356
	Ukraine	0.213	60.7	60.9

To compare with the electricity price in Ukraine, damage cost per kilowatt-hour of electricity generation in US dollars was converted to Ukrainian national currency, Ukrainian Hryvnya (UAH), in Table 10.

**Table 10.** Total damage cost per kilowatt-hour of electricity generation in UAH

Damage cost per kilowatt-hour, mUSD/kWh	With EU unit cost	With Ukrainian unit cost
		1.78

There is no doubt about this amount of money to be the external cost of electricity generation in Ukraine; because, the sum of money is not included in the price of electricity, and at the same time, the people affected by the air pollution from the electricity generation do not receive any compensation for the health impacts. Nowadays, Joint Stock Company «Kyivenergo» has fixed the average weighted tariff of electricity for consumers in the total amount of 0.2872 UAH/kWh [46]. However, it does not necessarily mean that the amount of the external costs obtained during this research should be added to the current price of electricity. On a contrary, policy makers in Ukraine should take into consideration the estimated external costs. And, it is necessary to find possible ways to reduce and/or internalize the external cost into the price mechanism of the electricity.

As shown above, the assessment of damage cost of the impact of the fossil-fuel electricity generation station was able to be made, using the recently developed method of monetary valuation of health impacts. There is an internationally practiced method, the Benefit Transfer Model, to transfer the values of the EU to non-EU countries including Ukraine, using the ratio of PPP GNP between the EU and non-EU countries. Also, the method to evaluate the people's willingness to pay for prolonging their life was examined in Ukraine, and compared to the calculated unit cost by the Benefit Transfer Model. While the unit cost evaluated from the interview surveys on the people's willingness to pay for prolonging one year of life is 18,000 US dollars, the unit cost calculated by the PPP GNP ratio of the EU and Ukraine is 15,600 US dollars, which are comparable to each other.

## CONCLUSIONS

Upon the results of the case study in Ukraine, the followings are concluded, and the direction of the future research is identified:

1. The externality study appeared in Europe and the United States in the 1990s as a result of existing problem of negative influence onto the human health,

natural environment, and built environment of air pollution from energy production. Since 1996, the ExternE project of the European Commission started the external cost assessment widely in the countries of the European Union. Unfortunately, in Ukraine this type of project had not been implemented.

2. The Impact Pathway Approach is the bottom-up method, which is to assess the impacts of electricity generation systems through step-by-step analysis, starting from emissions and completing with monetary valuation of the damages. It is a logical way of external cost assessment, which accounts the emitted pollutants and their ambient concentration, the impacts on human health, and their monetary values.

3. The Willingness to Pay Survey carried out among Kyiv citizens defined that Ukrainians estimate the value of life loss (VOLY) in the amount of 790 US dollars.

4. Calculation of health impacts and damage costs of air pollution from electricity generation at Trypilska Power Station in Ukrainka town were obtained, with the SimPacts Compute Code. These impacts and the damage costs were calculated in the local domain (up to 50 km radius) and in the regional domain (up to about 1000 km).

5. The damage cost of health impacts estimated by the EU unit costs is ten times larger than with the Ukrainian.

6. The estimated damage costs per kilowatt-hour of electricity generation is 360 mUSD/kWh and 61 mUSD/kWh by the EU unit cost and by the Ukrainian unit cost respectively. In comparison with the current electricity price in Ukraine, 57.6 mUSD/kWh or 0.2879 UAH/kWh (assuming 1 USD (dollars) = 5 UAH), it is concluded that the estimated external cost of the health impacts is sizable, in comparison with the price of electricity.

7. As shown above, the assessment of damage cost of the fossil-fuel electricity generation station was able to be made, using the recently developed method of monetary valuation of health impacts. There is an internationally practiced method, the Benefit Transfer Model, to transfer the value of the EU to non-EU countries including Ukraine, using the PPP GNP ratio between the EU and non-EU countries. Also, the method to evaluate the people's willingness to pay for prolonging their life was examined in Ukraine, and compared to the unit cost calculated by the Benefit Transfer Model. While the unit cost evaluated from the interview surveys on the people's willingness to pay for prolonging one year of life is 18 000 US dollars, the unit cost calculated by the PPP GNPs of the EU and Ukraine is 15 600 US dollars.

8. The estimated damage costs of Ukraine are the external cost that are not included in the price of electricity, and the people affected by the air pollution do not receive any compensation for the health impacts. The policy makers in Ukraine should take into consideration the estimated external costs and should find possible ways to reduce and/or internalize the external costs in the price mechanism.

## REFERENCES

1. Matsuki Y. Comparison of health and environmental impact of energy systems // International Journal of Risk Assessment and Management. — 2002. — 3. — № 1. — P. 1–15.
2. Ministry of Fuel and Energy of Ukraine. The amount of electricity production and consumption (2008). — [http://mpe.kmu.gov.ua/fuel/control/uk/publish/article?art\\_id=126559&cat\\_id=35086](http://mpe.kmu.gov.ua/fuel/control/uk/publish/article?art_id=126559&cat_id=35086).

3. Dubovyk V.S. Main tendencies of innovation development of fossil fuel energy of Ukraine in the mid-term period. — [http://incon-conference.org.ua/download/files/Dubovuk\\_dok.pdf](http://incon-conference.org.ua/download/files/Dubovuk_dok.pdf).
4. Bereznitskaya M.V., Butrim O.V., Panchenko H.H. et al. National Inventory of anthropogenic emissions from the sources and absorption of GHG absorbents in Ukraine during 1990–2006, Ministry for Environmental Protection of Ukraine. — Kyiv, 2008. — [http://menr.gov.ua/documents/Nac\\_zvit\\_p\\_parn\\_gazy\\_90-061.pdf](http://menr.gov.ua/documents/Nac_zvit_p_parn_gazy_90-061.pdf).
5. Pope C.A.III, Thun M.J., Namboodiri M.M., Dockery D.W. Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of US adults // American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine. — 1995. — **151**. — P. 669–674.
6. Dockery Y., Pope C.A.III, Xu X., Spengler J.D. An association between air pollution and mortality in six US cities // New England Journal of Medicine. — 1993. — **329**. — P. 1753–1759.
7. Wilson R., Colome S., Spengler J., Wilson D. Health effects of Fossil fuel burning: Assessment and Mitigation, Ballinger, Cambridge, 1980. — 392 p.
8. Bickel P., Friedrich R. Externalities of Energy. Methodology 2005 Update, European Commission, 2005. — 287 p. — <http://www.externe.info/>.
9. Rable A. Reference of Concentration-Response Functions for Health Impacts of Air Pollution // International Atomic Energy Agency, Vienna, 2001. — 243 p.
10. EC, DG Research. New Elements for the Assessment of External Costs from Energy Technologies: NewExt., Technological Development and Demonstration (RTD), 2004.
11. EC, DG XII. ExternE: Externalities of Energy. — **1**. — Summary, Luxembourg, 1996.
12. EC, DG XII. ExternE: Externalities of Energy. — **2**. — Methodology, Luxembourg, 1996.
13. EC, DG XII. ExternE: Externalities of Energy. — **3**. — Coal & Lignite, Luxembourg, 1996.
14. EC, DG XII. ExternE: Externalities of Energy. — **4**. — Oil & Gas, Luxembourg, 1996.
15. EC, DG XII. ExternE: Externalities of Energy — **5**. — Nuclear, Luxembourg, 1996.
16. EC, DG XII. ExternE: Externalities of Energy. — **6**. — Wind & Hydro, Luxembourg, 1996.
17. EC, DG XII. ExternE: Externalities of Energy. — **7**. — Methodology, 1998 update.
18. Oak Ridge. National Laboratory, Resources for the Future. U.S.–EC Fuel Cycle Study: Background Document to the Approach and Issues, Rep. № 1. — Oak Ridge Natl Lab., TN, 1992.
19. Oak Ridge. National Laboratory, Resources for the Future. Estimating Fuel Cycle Externalities: Analytical Methods and Issues, Rep. № 2. — McGraw-Hill/Utility Data Inst., Washington, DC, 1994.
20. Oak Ridge. National Laboratory, Resources for the Future. Estimating Externalities of Coal Fuel Cycles, Rep. № 3, McGraw-Hill/Utility Data Inst., Washington, DC, 1994.
21. Oak Ridge. National Laboratory, Resources for the Future. Estimating Externalities of Natural Gas Fuel Cycles, Rep. № 4, McGraw-Hill/Utility Data Inst., Washington, DC, 1998.
22. Oak Ridge. National Laboratory, Resources for the Future. Estimating Externalities of Oil Fuel Cycles, Rep. № 5, McGraw-Hill/Utility Data Inst., Washington, D.C., 1996.
23. Oak Ridge. National Laboratory, Resources for the Future. Estimating Externalities of Hydro Fuel Cycles, Rep. № 6, McGraw-Hill/Utility Data Inst., Washington, DC, 1994.
24. Oak Ridge. National Laboratory, Resources for the Future. Estimating Externalities of Biomass Fuel Cycles, Rep. № 7, McGraw-Hill/Utility Data Inst., Washington, DC, 1998.
25. Oak Ridge. National Laboratory, Resources for the Future. Estimating Externalities of Nuclear Fuel Cycles, Rep. № 8, McGraw-Hill/Utility Data Inst., Washington, DC, 1995.
26. RCG/Hagler Bailly. Inc, Tellus Institute. New York State Environmental Externalities Cost Study, Report 1: Externalities Screening and Recommendations, Empire State Electric Energy Research Corp., Albany, NY, 1993.

27. *RCG/Hagler*. Baily. Inc, Tellus Institute. New York State Environmental Externalities Cost Study, Report 2: Methodology, Empire State Electric Energy Research Corp., Albany, NY, 1994.
28. *RCG/Hagler*. Baily. Inc, Tellus Institute. New York State Environmental Externalities Cost Study, Report 3A: EXMOD User Manual, Empire State Electric Energy Research Corp., Albany, NY, 1995.
29. *RCG/Hagler*. Baily. Inc, Tellus Institute. New York State Environmental Externalities Cost Study, Report 3B: EXMOD Reference Manual, Empire State Electric Energy Research Corp., Albany, NY, 1995.
30. *RCG/Hagler*. Baily. Inc, Tellus Institute. New York State Environmental Externalities Cost Study, Report 4: Case Studies, Empire State Electric Energy Research Corp., Albany, NY, 1995.
31. *Rowe R.D., Chestnut L.G., Lang C.M., Bernow S.S., White D.E.* The New York environmental externalities cost study: summary of approach and results, OECD Workshop on the External Costs of Energy, Brussels, 1995.
32. *Kim S.H.* Evaluation of negative environmental impacts of electricity generation: Neoclassical and institutional approaches, *Energy Policy*. — **35**, Issue 1. 2007. — P. 413–423.
33. *US Environmental Protection Agency*. Guideline on Speciated Particulate Monitoring, Prep. by Chow J.C., Watson J.G. — 1998. — 291 p. — <http://www.epa.gov/ttnamti1/files/ambient/pm25/spec/drispec.pdf>.
34. *International Atomic Energy Agency*. Health and environmental impacts of electricity generation systems: procedures for comparative assessment, IAEA Technical Report Series, № 394. — 1999. — 204 p. — [http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS394\\_scr.pdf](http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS394_scr.pdf)
35. *Spadaro J.* AIRPACTs Impact Methodology. Version 1.0. — Vienna, IAEA, February 2002, 1 CD-ROM.
36. *Wilson R., Spengler J.* Particles in Our Air: Concentrations and Health Effects. Cambridge, MA: Harvard Univ. Press, 1996.
37. *Spadaro J.* AIRPACTs Impact Methodology. Version 1.0. — Vienna, IAEA, February 2002, 1 CD-ROM.
38. *Rabl A., et al.* Final Report on the monetary valuation of mortality and morbidity risks from air pollution, 2006.
39. *Rabl A.* Comparative Health and Environmental Risks on Nuclear and Other Energy Systems, the IAEA Research Coordination Meeting on the Coordinated Research Program, Vienna, 1997.
40. *Markandya A., Boyd R.* Economic Valuation of Environmental Impacts and External Costs, University of Bath, UK, 2000.
41. *Strukova E., Golub A., Markandya A.* Air Pollution Costs in Ukraine, Fondazione Eni Enrico Mattei, Milano, 2006. — <http://www.feem.it/Feem/Pub/Publications/WPapers/default.htm>.
42. *State Statistics Committee of Ukraine*. All Ukrainian Population Census 2001. — <http://www.ukrcensus.gov.ua/>
43. *Spadaro J.* AIRPACTs Input Data: Exposure Response Function, Version 1.0. — Vienna, IAEA, October 2002. — 1 CD-ROM.
44. *Rabl A.* Reference Database of Concentration-Response Functions for Health Impacts of Air Pollution, Ecole des Mines de Paris 60 boul. St.-Michel, F-75272, Paris 31 December, 2001.
45. *Spadaro J.* AIRPACTs Input Data, Monetary Unit, Version 1.0. — Vienna, IAEA, October 2002, 1 CD-ROM.
46. *Kyivenergo*. Tariff structure for electricity. — <http://www.mepress.kiev.ua/tariffs.php?artid=195>.

Received 23.11.2009

---

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



**АДАПТАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЙ РОЛЬОВОГО МЕРЕЖЕВОГО  
АНАЛІЗУ «REGULAR EQUIVALENCE»  
ТА «REGULAR ROLE COLORATION» ДЛЯ ПОБУДОВИ  
ТРОФІЧНИХ МЕРЕЖ ПАСТОРАЛЬНИХ ЕКОСИСТЕМ**

**С.С. РУДЕНКО, О.Я. БУЖДИГАН**

Обґрунтовано використання рольового мережевого аналізу в екології та нове розв'язання проблеми побудови трофічних мереж пасторальних екосистем на його основі. Адаптовано технології регулярної еквівалентності та колорації для моделювання рольових трофічних мереж наземних екосистем пасторального типу із усуненням біологічних несинітниць. Представлено етапи здійснення рольового мережевого аналізу для побудови повних та формалізованих трофічних мереж.

**ВСТУП**

Упродовж останніх років було висунуто багато ідей, що пов'язані з оцінкою ролі видів у трофічних мережах, використовуючи для цього такі терміни як екологічна гільдія [1], трофічний тип [2], трофовид [3] тощо. Проте до сьогодні це основне питання екосистемології залишається відкритим [4, 5]. Допомогти усунути цю прогалину можуть методи рольового мережевого аналізу, які вже давно застосовуються в суспільних науках. Серед них найбільш привабливими для екологів є методи регулярної еквівалентності («regular equivalence») та колорації («regular role coloration»).

Перші спроби застосувати регулярну еквівалентність та колорацію для побудови трофічних мереж екологічних систем з'явилися лише декілька років тому, і належать групі американських та англійських учених [6–8]. Ці автори застосовуючи інформацію про екологічні системи, що були описані іншими авторами в науковій літературі, продемонстрували можливість застосування таких методів, як «regular equivalence» (REGE-метод) та «regular role coloration» для побудови формалізованих трофічних мереж. Однак їх досвід поки що обмежується лише кількома малочленними водними екосистемами. До наземних екосистем (у тому числі пасовищного типу) зазначені вище методи рольового мережевого аналізу поки що не застосовувалися.

**ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ**

**Мета роботи** — адаптація технологій регулярної еквівалентності та колорації для побудови рольових трофічних мереж наземних екосистем пасторального типу.

Початковим етапом для здійснення рольового мережевого аналізу є побудова матриці, яка відображає наявність чи відсутність зв'язку між усіма парами елементів досліджуваної системи. Дана матриця слугує вхідною інформацією для REGE-методу рольового мережевого аналізу. При розробці звичайних неформалізованих трофічних схем різні вчені по-різному підходили до добору трофоелементів. Одні — схилилися до думки, що у якості трофоелементів необхідно вибирати всі види, що населяють екосистеми [1, 3, 4, 9–11], інші — до добору таксономічних рангів більш високого рівня (родів, класів і, навіть, царств) [2, 12]. Звичайно, добір трофоелементів на рівнях вищих за вид є простішим у плані практичної реалізації, адже визначення видової приналежності організмів займає багато часу в дослідника. Між іншим, при введенні у вхідну матрицю для побудови рольових трофічних мереж родів та таксонів більш високих рангів, дослідник вже здійснює ручне втручання в процедуру групування, яку від самого початку призначений реалізувати сам метод регулярної еквівалентності. Крім того, об'єднання видів у роди та родини здійснюється з метою систематизації живих організмів не за трофічними ролями, а за зовнішньою подібністю, тому внаслідок такої процедури види з різними трофічними ролями можуть бути об'єднані в одну систематичну, але не трофічну групу.

Отже, застосування в якості трофоелементів надвидових таксономічних рангів, як це мало місце при побудові класичних нерольових трофічних мереж, збіднює можливості самого рольового мережевого аналізу та погіршує його якість.

Аналіз перших прикладів застосування вже рольового мережевого аналізу в екології засвідчує, що дослідники не враховують того факту, що різні онтогенетичні стадії одного і того ж виду (наприклад, яйця, личинки, імаго) можуть займати різні трофічні ніші. По-різному можуть проявляти себе у трофічному ланцюгу й особини різних статей одного виду.

Враховуючи викладені вище міркування, ми поклали в основу створення вхідних матриць такі трофоелементи, як види, а також їх різні онтогенетичні стадії та статі у випадку, коли останні відіграють різну трофічну роль в екосистемі. Результати наших досліджень відображено на прикладі пасторальних екосистем Чернівецької області.

## ОПИС ДОСЛІДЖЕНЬ

При дослідженні екосистем пасторального типу в межах Чернівецької області у вхідні матриці мережевого рольового трофічного аналізу нами введено 494 трофоелементи. Для тих комах личинки та імаго яких мають різні трофічні ніші, а також для самців та самок, зазначені стадії та статі вносились у вхідну матрицю як окремі трофоелементи. Крім того, як окремі трофоелементи розглядались вегетативна маса рослин різних видів та їх пилок і нектар. У якості окремих трофоелементів вносились у вхідну матрицю мертві тварини, мертві рослини, детрит та екскременти великої рогатої худоби (ВРХ).

Загалом у вхідну матрицю було введено 15 різновидів трофоелементів (табл. 1). Кожний трофоелемент було кодовано порядковими номерами, які надалі застосовували у вхідних матрицях, графіках та схемах.

У цій роботі наведено наступне кодування трофоелементів для спрощення матриць та рисунків на прикладі трофічної мережі пасторальної екосистеми с. Банилів-Підгірний Чернівецької області (при визначенні рослин автори користувались джерелом [18], а тварин [19]): 19 — *Aphrophora alni* Fall. (Афрофора альні), 20 — *Stenodema laevigatum* L. (Сліпняк гладенький), 21 — *Athous niger* L. (Ковалик чорний), 24 — *Adelphocoris lineolatus* Gz. (Сліпняк люцерновий), 25 — *Decticus verrucivorus* L. (Стрибун сірий), 35a — *Lacon murinus* L. (Ковалик сірий (імаго)), 35в — *L. murinus* (личинка), 37 — *Polymerus cognatus* Fieb. (Клоп буряковий бурий), 48 — *Syritta pipiens* L. (Джюрчалка сирита), 76 — *Philaenus spumarius* L. (Пінявка звичайна), 78a — *Potosia lugubris* Hbst. (Бронзівка мармурова (імаго)), 78в — *P. lugubris* (личинка), 81 — *Dolycoris baccarum* L. (Щитник ягідний), 118 — *Cantharis rustica* Fall. (М'якотілка червононога), 121a — *Coccinella septempunctata* L. (Сонечко семикрапкове (імаго)), 121в — *C. septempunctata* (личинка), 126 — *Sympycna fusca* V. d. Lind. (Лютка тьмяна), 132a — *Musca domestica* L. (Муха кімнатна (імаго)), 132в — *M. Domestica* (личинка), 138 — *Tettigoniidae* (Коники справжні), 145 — *Dryopteris filix-mas* (L.) Schott (Щитник чоловічий), 146 — *Equisetum arvense* L. (Хвощ польовий), 149 — *Carex leporina* L. (Осока заяча) 168 — *Cynosurus cristatus* L. (Гребінник звичайний), 169 — *Elytrigia repens* (L.) Nevski (Пирій повзучий), 181 — *Prunella vulgaris* L. (Суховершки звичайні (вегетативна маса)), 181\* — *P. vulgaris* (пиллок та нектар), 182 — *Mentha arvensis* L. (М'ята польова (вегетативна маса)), 182\* — *M. arvensis* (пиллок та нектар), 185 — *Thymus serpyllum* L. (Чебрець звичайний (вегетативна маса)), 185\* — *T. serpyllum* (пиллок та нектар), 198 — *Trollius europaeus* L. (Купальниця європейська (вегетативна маса)), 198\* — *T. europaeus* (пиллок та нектар), 206 — *Potentilla anserina* L. (Перстач гусячий (вегетативна маса)), 206\* — *P. anserina* (пиллок та нектар), 208 — *Agrimonia grandis* Andr. ex. C.A. Mey. (Парило велике (вегетативна маса)), 208\* — *A. grandis* (пиллок та нектар), 212 — *Filipendula vulgaris* Moench. (Гадючник звичайний (вегетативна маса)), 212\* — *F. vulgaris* (пиллок та нектар), 213 — *Lotus arvensis* Pers. (Лядвенець польовий (вегетативна маса)), 213\* — *L. arvensis* (пиллок та нектар), 220 — *Achillea millefolium* Klok. et Krytzka (Деревій звичайний (вегетативна маса)), 220\* — *A. millefolium* (пиллок та нектар), 230 — *Leontodon hispidus* L. (Любочки шафранові (вегетативна маса)), 230\* — *L. hispidus* (пиллок та нектар), 232 — *Leucanthemum vulgare* Lam. (Королиця звичайна (вегетативна маса)), 232\* — *L. vulgare* (пиллок та нектар), 235 — *Ranunculus acris* L. (Жовтець їдкий (вегетативна маса)), 235\* — *R. acris* (пиллок та нектар), 236 — *Euphorbia cyparissias* L. (Молочай кипарисовидний (вегетативна маса)), 236\* — *E. cyparissias* (пиллок та нектар), 242 — *Trifolium pratense* L. (Конюшина лучна (вегетативна маса)), 242\* — *T. pratense* (пиллок та нектар), 249 — *Plantago media* L. (Подорожник середній), 250 — *Plantago lanceolata* L. (Подорожник ланцетолистий), 252 — *Lysimachia nummularia* L. (Вербозілля лучне (вегетативна маса)), 252\* — *L. nummularia* (пиллок та нектар), 268 — *Campanula patula* L. (Дзвоники розлогі (вегетативна маса)), 268\* — *C. patula* (пиллок та нектар), 270 — *Carduus crispus* L. (Будяк курчавий (вегетативна маса)), 270\* — *C. crispus* (пиллок та нектар), 283 — *Juncus bufonius* L. (Ситник жаб'ячий), 284 — *Bellis perennis* L. (Стокротки багаторічні (вегетативна маса)), 284\* — *B. perennis* (пиллок та нектар), 304 — *Rhinanthus minor* L. (Дзвінець малий (вегетативна маса)), 304\* — *R. minor* (пиллок та нектар), 311 — *Viola arvensis* Murr. (Фіалка польова), 320р — мертві рослини, 321т — мертві тварини (трупі комах та черв'яків), 322 — Детрит (напіврозкладені рештки рослин та комах), 323 — До-

щові черв'яки, 324 — Гетеротрофні бактерії, 325 — Мікроміцети, 326 — Актиноміцети, 327 — екскременти ВРХ, 328 — ВРХ.

Згідно із патентом [17] авторами було розроблено наступну систему позначень: **а** — імаго комах; **в** — личинка комах; \* — пилок і нектар рослин; **т** — мертві тварини; **р** — мертві рослини.

**Таблиця 1.** Кількість трофоелементів у вхідній матриці для рольового мережевого аналізу трофічної структури пасторальних екосистем

№	Трофоелементи	Кількість трофоелементів
1.	Личинки комах	28
2.	Імаго комах	136
3.	Самці комах	4
4.	Самки комах	4
5.	Вегетативна маса рослин	179
6.	Пилок та нектар рослин	134
7.	Мертві рослини	1
8.	Мертві тварини	1
9.	Детрит	1
10.	Дощові черв'яки	1
11.	Гетеротрофні бактерії	1
12.	Мікроміцети	1
13.	Актиноміцети	1
14.	Екскременти ВРХ	1
15.	ВРХ	1
	Σ	494

При позначенні наявності чи відсутності зв'язків між зазначеними елементами у вхідній матриці для рольового мережевого аналізу трофічної структури екосистем пасторального типу постали такі дискусійні питання:

1. Чи пов'язано пилок вихідними зв'язками із мертвими рослинами?
2. Чи рослини, які поїдаються хоча б одним видом комах чи ВРХ, пов'язані вихідними зв'язками із мертвими рослинами?
3. Чи комах, які поїдаються іншими комахами, пов'язані вихідними зв'язками із мертвими комахами?

Відповіді на ці питання є важливими, оскільки відомо, що непродумане математичне моделювання нерідко призводить до біологічних несинітниць.

Усі зазначені вище питання з'ясовано на прикладі побудови вхідної матриці однієї із пасторальних екосистем, а саме, для пасторальної екосистеми с. Банилів-Підгірний Чернівецької області. При пошуку відповідей на досліджувані питання ми дійшли висновку, що їх не можливо розглянути відокремлено одне від одного. Тому було досліджено чотири можливих комбінації:

- коли види рослин і види комах при поїданні іншими трофоелементами, а також пилок, не мають вихідного зв'язку з мертвими рослинами та мертвими тваринами відповідно;

- коли види рослин та види комах при поїданні іншими видами не мають вихідного зв'язку з мертвими рослинами та мертвими тваринами відповідно, а пилкок в будь-якому випадку пов'язаний вихідними зв'язками з мертвими рослинами;

- коли пилкок не має вихідного зв'язку з мертвими рослинами, а види рослин чи комах у будь-якому випадку (незалежно від того чи поїдаються вони іншими трофоелементами) пов'язано вихідними зв'язками з мертвими рослинами та мертвими тваринами відповідно;

- коли види рослин чи комах в будь-якому випадку (не залежно від того чи поїдаються вони іншими трофоелементами) та пилкок пов'язані вихідними зв'язками з мертвими рослинами та мертвими тваринами відповідно.

Три перших комбінації призводили до біологічних несинітниць у трофічних мережах, які виявлялися в об'єднанні алгоритму REGE-методу в один трофоклас наступних трофоелементів:

- ВРХ (328), мертвих комах (321т), мертвих рослин (320р), детриту (322) та комах (рис. 1);

- гетеротрофних бактерій (324), мікроміцет (325), актиноміцет (326), екскрементів ВРХ (327), пилку рослин, вегетативної маси рослин, дощових черв'яків (323) та деяких комах (рис. 1);

- ВРХ (328), пилку та вегетативної маси деяких рослин (рис. 2);

- мертвих рослин та екскрементів ВРХ (рис. 2).

Матриця з комбінацією, коли види рослин та комах в будь-якому випадку (незалежно від того чи поїдаються вони іншими трофоелементами) та пилкок пов'язані вихідними зв'язками з мертвими рослинами та мертвими тваринами відповідно виявилась найбільш біологічно правильною, оскільки REGE-алгоритм з одного боку зберіг інформацію про цінні трофічні ролі для пасторальних екосистем, а з іншого — не спричинив будь-яких біологічних несинітниць (рис. 5). Крім того, ця комбінація виправдала себе й на інших досліджуваних екосистемах.

Отже, аргументований добір трофоелементів дозволив розробити базову матрицю для рольового мережевого аналізу трофічних мереж пасторальних екосистем помірних широт, яка від тепер може бути використана будь-яким дослідником, що працює в даному напрямку.

Подальша технологія побудови рольових трофічних мереж обіймала чотири етапи, які розглянемо на прикладі обраної пасторальної екосистеми.

Спочатку будували матрицю бінарних коефіцієнтів (вид-вид) керуючись наступним принципом: 0 — при відсутності зв'язку, 1 — при наявності зв'язку. Зв'язки кожного трофоелементу з іншими трофоелементами оцінювали як у ролі хижака (в колонках матриці), так і в ролі жертви (в рядках матриці) (рис. 3).

Далі для аналізу даних застосовано REGE-алгоритм методу «regular equivalence» з комп'ютерного програмного пакету UCINET 6.164 (S. Borgatti, M. Everett, L. Freeman) [13].

Суть алгоритму REGE-методу регулярної еквівалентності рольового мережевого аналізу зводиться до наступних операцій, які виконує UCINET 6.164.

Нехай  $r_{ij} = 1$  для всіх « $i$ » та « $j$ » (види є 100% еквівалентними до перших), тоді:

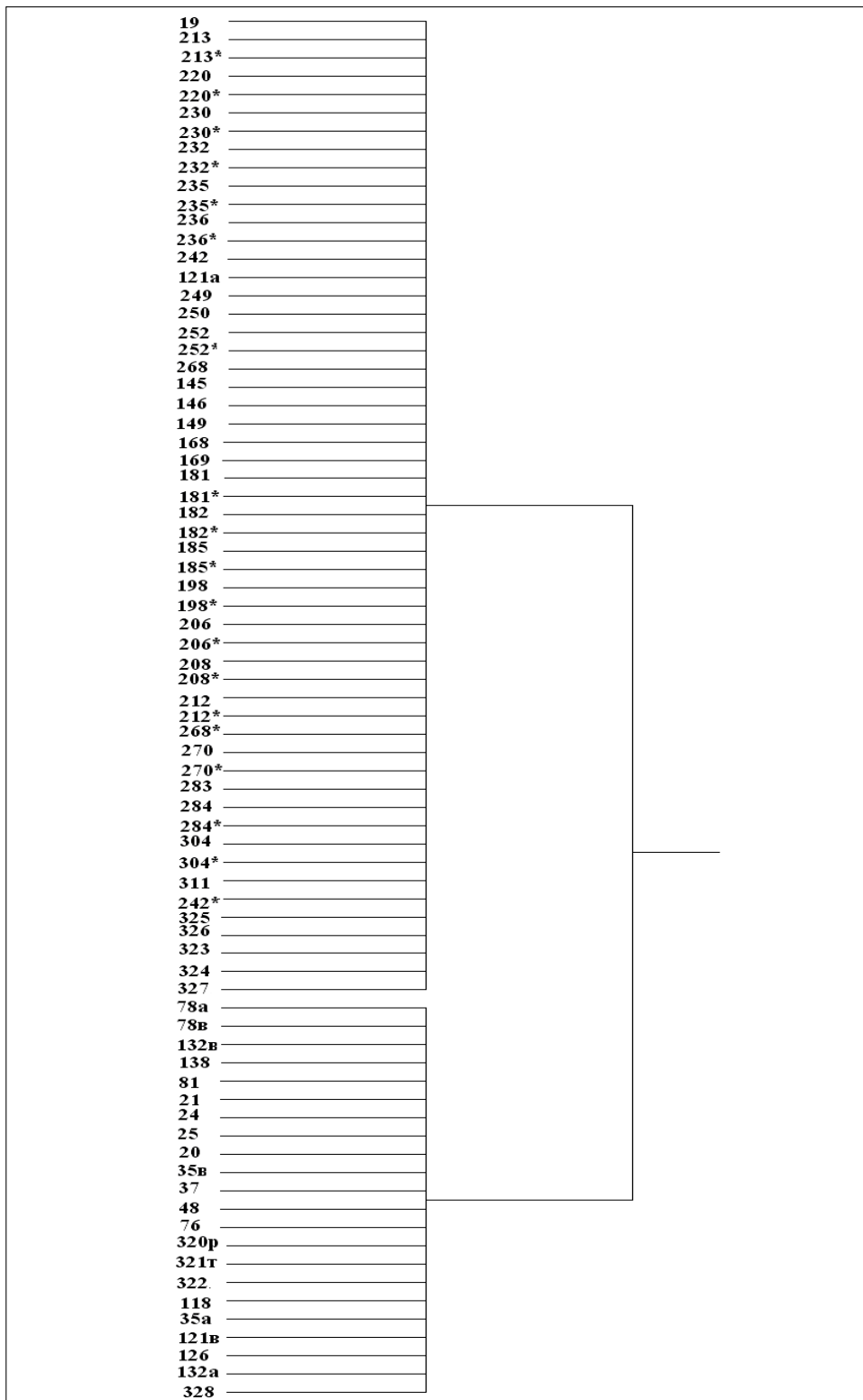


Рис. 1. Дендрограма невдалого ієрархічного кластерування, яку було одержано із застосуванням програмного пакету UCINET 6.164 на прикладі трофічної мережі пасторальної екосистеми с. Банилів-Підгірний Чернівецької області

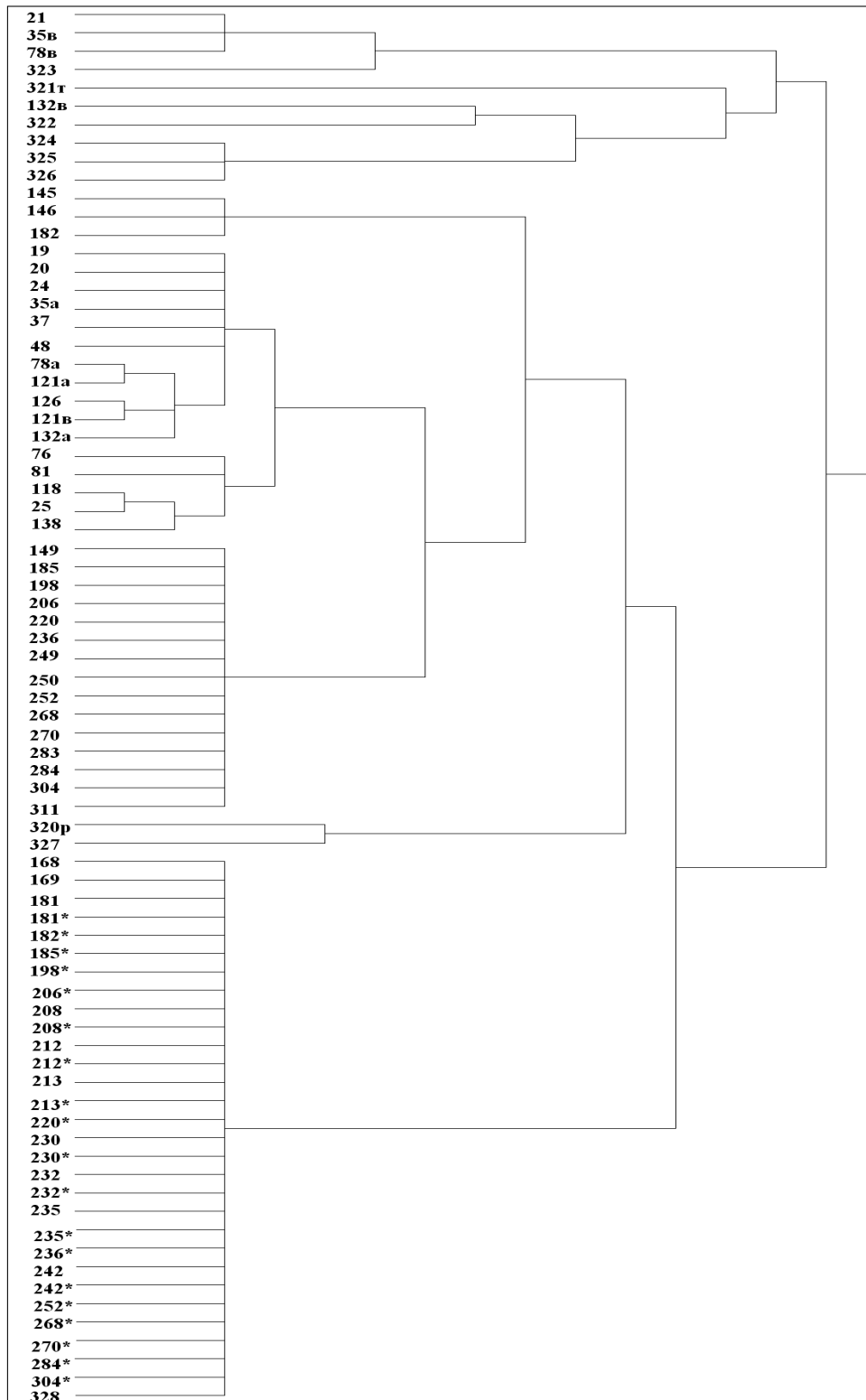


Рис. 2. Дендрограма успішного ієрархічного кластерування, яку було одержано із застосуванням програмного пакету UCINET 6.164 на прикладі трофічної мережі пасторальної екосистеми с. Банилів-Підгірний Чернівецької області

	19	20	21	24	25	35a	35в	37	48	76
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35в	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
76	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
78a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
78в	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
81	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
118	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
121a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
121в	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
126	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
132a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
132в	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
138	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
145	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
146	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
149	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0
168	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0

Рис. 3. Вхідна матриця бінарних коефіцієнтів (при 1 — існує трофічний зв'язок між трофоелементами, при 0 — трофічний зв'язок відсутній) для здійснення рольового мережевого аналізу трофічної структури на прикладі пасторальної екосистеми с. Банилів-Підгірний Чернівецької області (в рядках трофоелементи виступають у ролі ресурсу (жертв), а в колонках — у ролі споживачів (хижаків))

1. Якщо всі види — жертви (« $n$ » та « $m$ » відповідно), які поїдаються видами « $i$ » та « $j$ » збігаються на 100%, тобто це максимальна еквівалентність, а коефіцієнт еквівалентності дорівнює одиниці, то для кожного виду  $k$ , які є жертвами для « $i$ » програма шукає види « $m$ », які є жертвами для « $j$ » водночас є повністю еквівалентними до  $k$ . Звісно, що кількість видів « $n$ », які поїдаються « $j$ » та дорівнює кількості видів « $m$ », які з'їдаються « $i$ ».

2. Програма повторює крок 1 до того випадку, коли зміни вже не відбуваються у  $r_{ij}$  або якщо досягається максимум повторностей. Максимум повторностей дорівнює  $N$  видів або груп. Деталі алгоритму описані S. Borgatti та M. Everett [14, 15].

Алгоритм перетворює матрицю «вид-вид» на матрицю REGE із коефіцієнтами  $R$  (у межах від нуля до одиниці), які реєструються для кожної пари трофоелементів (рис. 4).

Для візуалізації моделей подібності, одержаних за допомогою REGE-методу, матриці подібностей піддавали неметричному багатовимірному шкалюванню (MDS — неметричне багатовимірне шкалювання) у порядку репрезентування подібностей як відстаней у двох просторах. Координати з процедури MDS потім використовували як вхідну інформацію для програми Rajek 1.14 (V. Batagelj, A. Mrvar) [16] мережевого графічного програмного забезпечення, за допомогою якої будували графічні схеми повних трофічних (рис. 7).

Надалі проведено ієрархічне кластерування вихідних матриць  $R$  із REGE-алгоритму методу «regular equivalence» та отримано дендрограми з розподілом зв'язків між трофічними елементами (рис. 5).





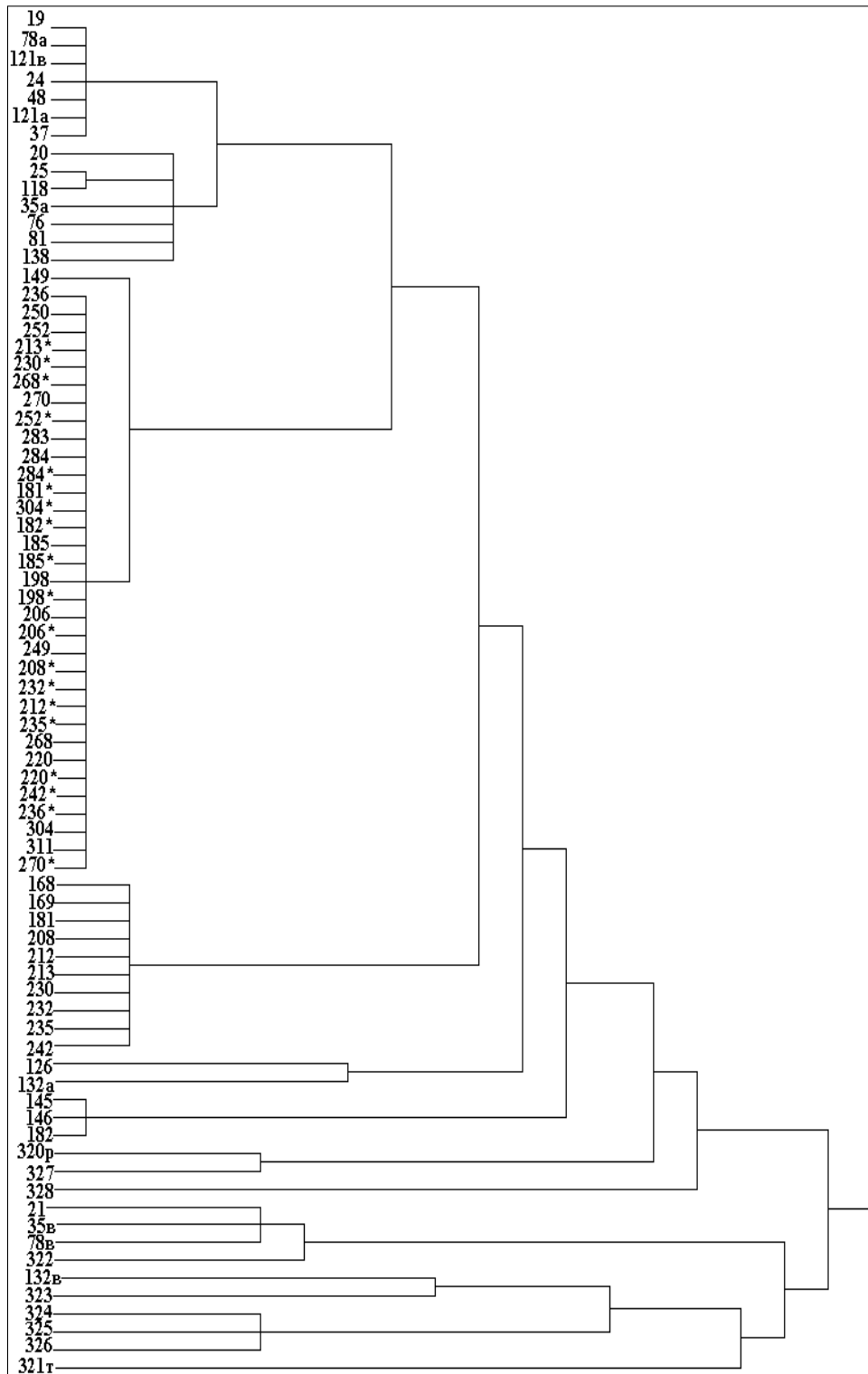


Рис. 5. Дендрограма ієрархічного кластерування із застосуванням регулярної еквіваленції рольового мережевого аналізу на прикладі трофічної мережі пасторальної екосистеми с. Банилів-Підгірний Чернівецької області, що свідчить про відсутність біологічних несинітниць при побудові трофічної мережі



виявився максимальним лише для такої кількості кластерів і немає підстав для їх об'єднань, то кількість трофічних класів також повинна дорівнювати 15.

За результатами ієрархічного кластерування було об'єднано відповідні трофоелементи у відповідну кількість трофокласів у формалізованій матриці (рис. 8), яка слугувала вхідною інформацією для Рајек 1.14 для побудови формалізованих трофічних мереж (рис. 9).

	21, 35в, 78в	19, 20, 24, 25, 35а, 37, 48, 76, 78а, 81, 118, 121а, 121в, 138	126	132а	132в	145, 146, 182	149, 181*, 182*, 185, 185*, 198, 198*, 206, 206*, 208*, 212*, 213*, 220, 220*, 230*, 232*, 235*, 236, 236*, 242*, 249, 250, 252, 252*, 268, 268*, 270, 270*, 283, 284, 284*, 304, 304*, 311	168, 169, 181, 208, 212, 213, 230, 232, 235, 242	320р	321т	322	323	324, 325, 326	327	328
21, 35в, 78в	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
19, 20, 24, 25, 35а, 37, 48, 76, 78а, 81, 118, 121а, 121в, 138	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
126	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
132а	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
132в	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
145, 146, 182	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
149, 181*, 182*, 185, 185*, 198, 198*, 206, 206*, 208*, 212*, 213*, 220, 220*, 230*, 232*, 235*, 236, 236*, 242*, 249, 250, 252, 252*, 268, 268*, 270, 270*, 283, 284, 284*, 304, 304*, 311	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
168, 169, 181, 208, 212, 213, 230, 232, 235, 242	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
320р	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
321т	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
322	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
323	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
324, 325, 326	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
327	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
328	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Рис. 8. Матриця бінарних коефіцієнтів (при 1 — існує трофічний зв'язок між трофокласами, при 0 — трофічний зв'язок відсутній) для побудови графу формалізованої трофічної мережі на прикладі пасторальної екосистеми с. Банилів-Підгірний Чернівецької області за результатами ієрархічного кластерування матриці REGE подібності при застосуванні регулярної еквівалентії рольового мережевого аналізу. Кількість трофокласів відповідає величині відповідності кластеру ( $\text{Eta} = 15$ )

Згідно із формалізованою матрицею, трофоелементи, що відносяться до одного трофокласу зафарбовано ідентичним кольором у графах як повної, так і формалізованої трофічних мереж. Метод позначення ідентичним кольором трофоелементів одного трофокласу у рольовому мережевому аналізі має назву метод регулярної рольової колорації «regular role coloration» (рис. 7, 9). У нашому випадку, якщо до застосування рольового мережевого аналізу трофічна мережа (як і вхідна матриця) нараховувала 76 трофічних елементів (рис. 7), то після застосування регулярної еквівалентії вони об'єдналися у 15 трофокласів.

Забарвлення куль в ідентичний колір на рис. 7 зроблено вже після одержання формалізованого графу. При цьому елементи, що ввійшли в один трофоклас у формалізованому графі (рис. 9) були зафарбовані одним кольором у неформалізованому (рис. 7).

Кожна куля у неформалізованому графі відповідає відповідному трофоелементу у трофічній мережі. Напрямки стрілок показують напрямок взаємодії між відповідними трофоелементами у трофічній мережі. Номери біля куль відповідають порядковим номерам при кодуванні трофоелементів досліджуваної екосистеми.

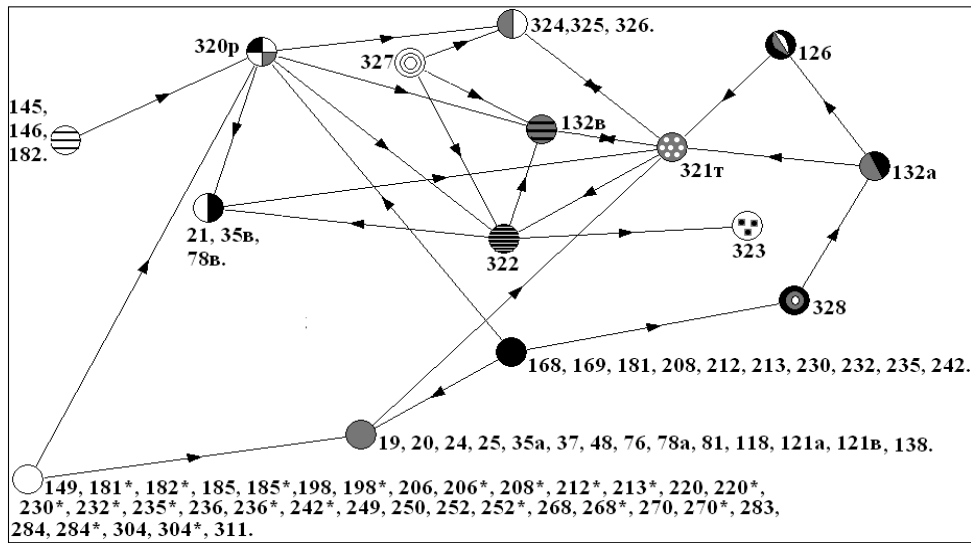


Рис. 9. Граф формалізованої трофічної мережі, побудований із застосуванням методу «regular equivalence» рольового мережевого аналізу на прикладі пасторальної екосистеми с. Банилів-Підгірний Чернівецької області

Кожна куля у формалізованому графі відповідає окремому трофокласу в який віднесено відповідні трофоелементи (номери біля куль відповідають порядковим номерам при кодуванні трофоелементів досліджуваної екосистеми). Напрямки стрілок показують напрямок взаємодії між відповідними трофокласами у трофічній мережі. Забарвлення куль в ідентичний колір («regular role coloration») свідчить про окремі трофокласи, куди REGE-алгоритм згрупував відповідні трофоелементи за подібністю їх трофічних ролей у трофічній мережі досліджуваної екосистеми.

## ВИСНОВКИ

1. Уперше на прикладі тридцять однієї пасторальної екосистеми Чернівецької області було доведено можливість застосування рольового мережевого аналізу для побудови формалізованих рольових трофічних мереж екосистем відповідного типу.

2. Відпрацьовано цілий ряд технологічних моментів, які дозволяють широко використовувати такі відомі методи суспільних наук як «regular equivalence» та «regular role coloration» у пасторальній екосистемології.

3. Інноваційна технологія завдяки формалізації відкриває нові можливості для розвитку фундаментальної екології.

Перспективи: сьогодні в екологічній науці рольовий мережевий аналіз переживає період становлення. Є надія, що найближчим часом за його допомогою будуть відкриті нові екологічні закономірності, зокрема ті, що стосуються імперативної ролі трофічної структури у підтриманні стійкості екосистем.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Root R. The niche exploitation pattern of the blue-gray gnatcatcher // Ecology Monographs. — 1967. — № 37. — P. 317–350.

2. *Beaver R.* Geographical variation in food web structure in *Nepenthes* pitcher plants // *Ecological Entomology*. — 1985. — № 10. — P. 241–248.
3. *Yodzis P.* The indeterminacy of ecological interactions as perceived through perturbation experiments // *Ecology*. — 1988. — № 69. — P. 508–515.
4. *Perrson L.* Productivity and consumer regulation — concepts, patterns, and mechanisms // *Food webs: integration of patterns and dynamics*. — NY: Chapman and Hall, 1996. — P. 96–434.
5. *Cousins S.* The decline of the trophic level concept // *Trends Ecology & Evolution*. — 1987. — № 2. — P. 312–316.
6. *Johnson J.* Network role analysis in the study of food webs. An application of regular role coloration // *Journal of Social Structure*. — 2001. — № 3. — <http://www.cmu.edu/joss/content/articles/volume2/JohnsonBorgatti.html>.
7. *Luczkovich J.* Defining and measuring trophic role similarity in food webs using regular equivalence // *Journal of Theoretical Biology*. — 2003. — № 220. — P. 303–321. — <http://www.idealibrary.com>.
8. *Luczkovich J.* Determining the trophic guilds of fishes and macroinvertebrates in a seagrass food web // *Estuaries*. — 2002. — № 25 (6). — P. 1143–1164.
9. *Pimm S.* Food web patterns and their consequences // *Nature*. — 1991. — № 350. — P. 669–674.
10. *Goldwasser L.* Construction and analysis of a large Caribbean food web // *Ecology*. — 1993. — № 74. — P. 1216–1233.
11. *Гандзюра В.П.* Екологія. Головні поняття з позицій системного підходу. — Київ: Вид-во КНУ, 2002. — 85 с.
12. *Lindeman R.* The trophic-dynamic aspect of ecology // *Ecology*. — 1942. — № 23. — P. 399–418.
13. *Borgatti S.* The program Ucinet 6 for Windows runs on Windows 95/98/NT/2000/XP platforms with a minimum of 8 mb of RAM: Software for Social Network Analysis. — Harvard: Analytic Technologies, 2002. — <http://www.analytictech.com>.
14. *Borgatti S.* Two algorithms for computing regular equivalence // *Social Networks*. — 1993. — № 15. — С. 361–376.
15. *Borgatti S.* The class of all regular equivalences: algebraic structure and computation // *Social Networks*. — 1989. — № 11. — P. 65–88.
16. *Batagelj V.* The program Pajek. — 1996. — <http://vlado.fmf.uni-lj.si/pub/networks/pajek>.
17. *Патент* на корисну модель 43962 України, МПК (2009) А 99Z 99/00G01N 33/00. «Спосіб побудови трофічної мережі пасторальної екосистеми» / Руденко С.С. (UA), Буждиган О.Я. (UA); заявник та патентовласник Чернівецький нац. ун-т ім. Ю. Федьковича. — № u 200903519. — Заявл. 13.04.2009; опублік. 10.09.2009, Бюл. № 17. — 24 с.
18. *Определитель* высших растений Украины / Сост.: Д.Н. Доброчаева, М.И. Котов, Ю.Н. Прокудин и др. — 2-е изд. стереот. — Киев: Фитоцентр, 1999. — 548 с.
19. *Фасулати К.К.* Полевое изучение наземных беспозвоночных. — М.: Высш. шк., 1971. — 424 с.

Надійшла 26.03.2009

## **A MULTI-OBJECTIVE MIXED INTEGER PROGRAMMING MODEL FOR MULTI ECHELON SUPPLY CHAIN NETWORK DESIGN AND OPTIMIZATION**

**TURAN PAKSOY, EREN ÖZCEYLAN, GERHARD-WILHELM WEBER**

This paper applies a mixed integer linear programming to designing a multi echelon supply chain network (SCN) via optimizing commodity transportation and distribution of a SCN. Proposed model attempts to aim multi objectives of SCN by considering total transportation costs and capacities of all echelons. The model composed of three different objective functions. The first one is minimizing the total transportation costs between all echelons. Second one is minimizing of holding and ordering costs in distribution centers (DCs) and the last objective function is minimizing the unnecessary and unused capacity of plants and DCs.

### **1. INTRODUCTION**

Supply chain management has been a hot topic in the management arena in the recent years. The term «supply chain» conjures up images of products, or supplies, moving from manufacturers to distributors to retailers to customers, along a chain, in order to fulfill a customer request (Gong et al., 2008).

Supply chain management (SCM) explicitly recognizes interdependencies and requires effective relationship management between chains. The challenge in global SCM is the development of decision-making frameworks that accommodate diverse concerns of multiple entities across the supply chain. Considerable efforts have been expended in developing decision models for supply chain problems (Narasimhan and Mahapatra, 2004).

Enterprises have to satisfy customers with a high service level during standing high transportation, raw material and distribution costs. In traditional supply chains, purchasing, production, distribution, planning and other logistics functions are handled independently by decision makers although supply chains have different objectives. To overcome global risks in related markets, decision makers are obliged to fix a mechanism which different objective functions (minimizing transportation/production, backorder, holding, purchasing costs and maximizing profit and customer service level etc.) can be integrated together. Illustration of a supply chain network includes suppliers, plants, DCs and customers in Fig. 1 (Syarif et al., 2002).

The design of SC networks is a difficult task because of the intrinsic complexity of the major subsystems of these networks and the many interactions among these subsystems, as well as external factors such as the considerable multi objective functions (Gumus et al., 2009). In the past, this complexity has forced much of the research in this area to focus on individual components of supply chain networks. Recently, however, attention has increasingly been placed on the performance, design, and analysis of the supply chain as a whole.

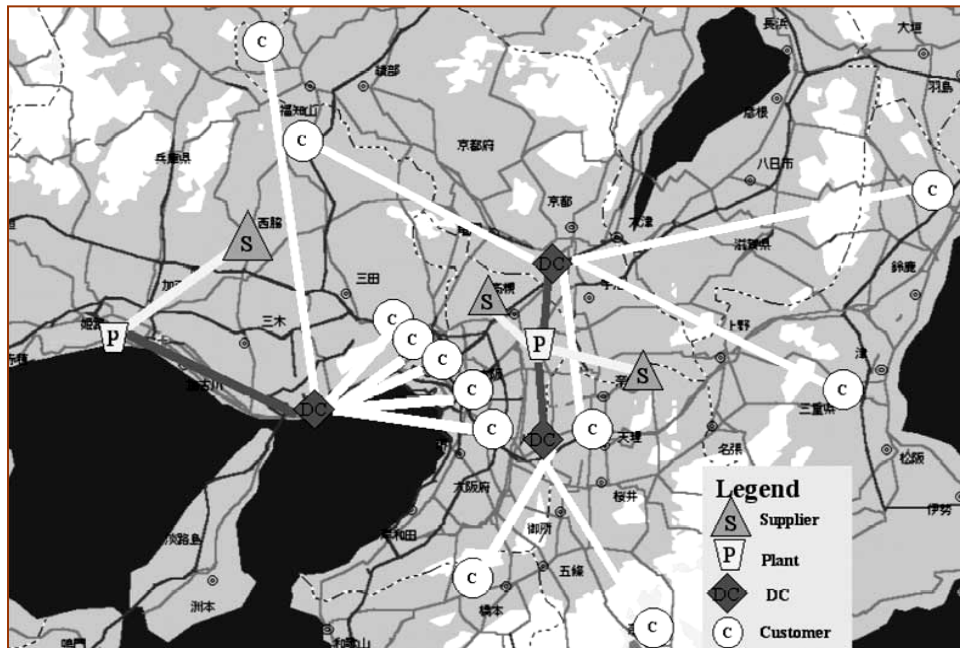


Fig. 1. Illustration of a Supply Chain Network (Syarif et al. 2002)

Supply chains performance measures are categorized as qualitative and quantitative. Customer satisfaction, flexibility, and effective risk management belong to qualitative performance measures. Quantitative performance measures are also categorized by: (1) objectives that are based directly on cost or profit such as cost minimization, sales maximization, profit maximization, etc. and (2) objectives that are based on some measure of customer responsiveness such as fill rate maximization, customer response time minimization, lead time minimization, etc (Altıparmak et al., 2006).

However, the SCM design and planning is usually involving trade-offs among different goals. In this study, we developed a mixed integer linear programming model to design and optimize a supply chain network via providing multi objective functions mentioned above together. We considered three objectives for SCM problem: (1) minimization of total transportation costs between suppliers-manufacturers-distribution centers and distribution costs between distribution centers and customers, (2) minimization of holding and ordering costs in DCs based EOQ (economic order quantity) and (3) providing equity of the capacity utilization ratio of manufacturers and DCs.

In this field, numerous researches are conducted. (Williams, 1981), developed seven heuristic algorithms to minimize distribution and production costs in supply chain. (Cohen and Lee, 1989), present a deterministic, mixed integer, non-linear programming with economic order quantity technique to develop global supply chain plan. (Pyke and Cohen), 1993, developed a mathematical programming model by using stochastic sub-models to design an integrated supply chain involves manufacturers, warehouses and retailers. (Özdamar and Yazgaç, 1997), developed a distribution/production system involves a manufacturer center and its warehouses. They try to minimize total costs such as inventory; transportation



costs etc under production capacity and inventory equilibrium constraints. (Petrovic et al., 1999), modeled supply chain behaviors under fuzzy constraints. Their model showed that, uncertain customer demands and deliveries play a big role about behaviors. (Syarif et al., 2002), developed a new algorithm based genetic algorithm to design a supply chain distribution network under capacity constraints for each echelon. (Yan et al., 2003), tried to contrive a network which involves suppliers, manufacturers, distribution centers and customers via a mixed integer programming under logic and material requirements constraints. (Yilmaz, 2004), handled a strategic planning problem for three echelon supply chain involves suppliers, manufacturers and distribution centers to minimize transportation, distribution, production costs. (Chen and Lee, 2004), developed a multi-product, multi-stage, and multi-period scheduling model to deal with multiple incommensurable goals for a multi-echelon supply chain network with uncertain market demands and product prices. The uncertain market demands are modeled as a number of discrete scenarios with known probabilities, and the fuzzy sets are used for describing the sellers' and buyers' incompatible preference on product prices. The supply chain scheduling model is constructed as a mixed-integer nonlinear programming problem to satisfy several conflict objectives, such as fair profit distribution among all participants, safe inventory levels, maximum customer service levels, and robustness of decision to uncertain product demands, therein the compromised preference levels on product prices from the sellers and buyers point of view are simultaneously taken into account. (Nagurney and Toyasaki, 2005), try to balance e-cycling in multi tiered supply chain process. (Gen and Syarif, 2005), developed a hybrid genetic algorithm for a multi period multi product supply chain network design. (Paksoy, 2005), developed a mixed integer linear programming to design a multi echelon supply chain network under material requirement constraints. (Lin et al., 2007), compared flexible supply chains and traditional supply chains with a hybrid genetic algorithm and mentioned advantages of flexible ones. (Wang, 2007), explained the imbalance between echelons with peccant supply chain by changing chain's perfect balanced. He used ant colony technique to minimize costs in peccant imbalanced supply chains. (Azaron et al., 2008), developed a multi-objective stochastic programming approach for supply chain design under uncertainty. Demands, supplies, processing, transportation, shortage and capacity expansion costs are all considered as the uncertain parameters. Their multi-objective model includes (i) the minimization of the sum of current investment costs and the expected future processing, transportation, shortage and capacity expansion costs, (ii) the minimization of the variance of the total cost and (iii) the minimization of the financial risk or the probability of not meeting a certain budget. (You and Grossmann, 2008), addressed the optimization of supply chain design and planning under responsive criterion and economic criterion with the presence of demand uncertainty. By using a probabilistic model for stock-out, the expected lead time is proposed as the quantitative measure of supply chain responsiveness. (Schütz et al., 2008), presented a supply chain design problem modeled as a sequence of splitting and combining processes. They formulated the problem as a two-stage stochastic program. The first-stage decisions are strategic location decisions, whereas the second stage consists of operational decisions. The objective is to minimize the sum of invest-

ment costs and expected costs of operating the supply chain. (Tuzkaya and Önüt, 2009), developed a model to minimize holding inventory and penalty cost for suppliers, warehouse and manufacturers based a holonomic approach. (Sourirajan et al., 2009), considered a two-stage supply chain with a production facility that replenishes a single product at retailers. The objective is to locate distribution centers in the network such that the sum of facility location, pipeline inventory, and safety stock costs is minimized. They use genetic algorithms to solve the model and compare their performance to that of a Lagrangian heuristic developed in earlier work. (Ahumada and Villalobos, 2009), reviewed the main contributions in the field of production and distribution planning for agri-foods based on agricultural crops. Through their analysis of the current state of the research, they diagnosed some of the future requirements for modeling the supply chain of agri-foods. (Gunasekaran and Ngai, 2009), have developed a unified framework for modeling and analyzing BTO-SCM and suggest some future research directions. (Xu and Nozick, 2009), formulated a two-stage stochastic program and a solution procedure to optimize supplier selection to hedge against disruptions. Their model allows for the effective quantitative exploration of the trade-off between cost and risks to support improved decision-making in global supply chain design. (Shin et al., 2009), provided buying firms with a useful sourcing policy decision tool to help them determine an optimum set of suppliers when a number of sourcing alternatives exist. They proposed a probabilistic cost model in which suppliers' quality performance is measured by inconformity of the end product measurements and delivery performance is estimated based on the suppliers' expected delivery earliness and tardiness.

After giving the introduction and the relevant literature, At the second section, the proposed model which is a multi objective mixed integer linear programming model is presented. We tested the novel model with a numerical example and discussed the results obtained by LINGO package programmer at the last section.

## **2. PROBLEM STATEMENT**

Here, the constituted model represents three echelons, multi supplier, multi manufacturer, multi DC, and multi customer problem. Decision maker wishes to design of SC network for the end product, select suppliers, determine the manufacturers and DCs and design the distribution network strategy that will satisfy all capacities and demand requirement for the product imposed via customers. The problem is a single-product, multi-stage SCN design problem. Considering company managers' objectives, we formulated the SCN design problem as a multi-objective mixed-integer non-linear programming model. The objectives are minimization of the total cost of supply chain, minimization holding and ordering costs in DCs, and maximization of capacity utilization balance for DCs (i.e. equity on utilization ratios). The assumptions used in this problem are: (1) the number of customers and suppliers and their demand and capacities are known, (2) the number of plants and DCs and their maximum capacities are known, (3) customers are supplied product from a single DC. Fig. 2 presents a simple network of three-stages in supply chain network.

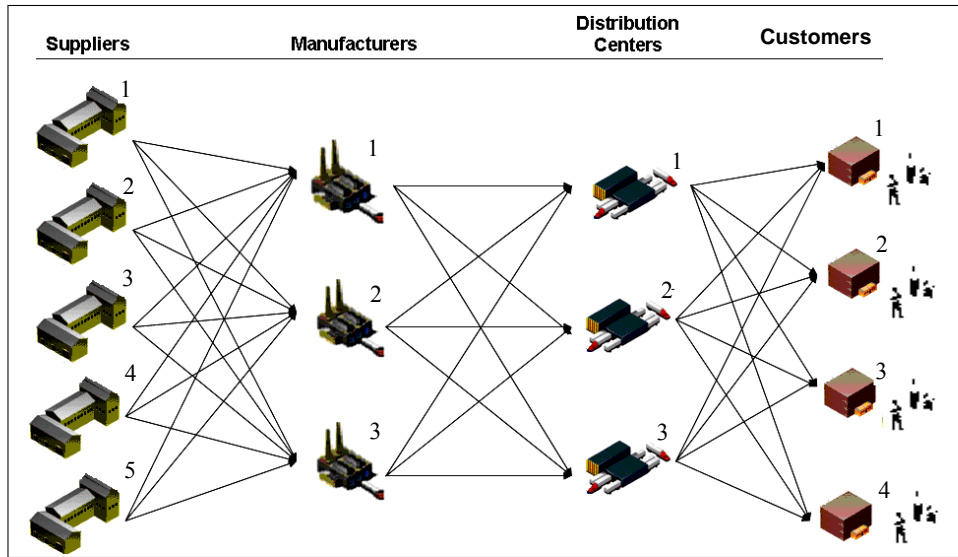


Fig. 2. Supply Chain Network of Proposed Model

**2.1 Model Variables and Parameters.**

$i$  is an index for customers ( $i \in I$ ),

$j$  is an index for DCs ( $j \in J$ ),

$k$  is an index for manufacturing plants ( $k \in K$ ),  $s$  is an index for suppliers ( $s \in S$ ),

$b_{sk}$  is the quantity of raw material shipped from supplier  $s$  to plant  $k$ ,

$f_{kj}$  is the quantity of the product shipped from plant  $k$  to DC  $j$ ,  $q_{ji}$  is the quantity of the product shipped from DC  $j$  to customer  $i$ ,

$$y_{ji} = \begin{cases} 1, & \text{if DC } j \text{ serves customer } i, \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

$D_k$  is the capacity of plant  $k$ ,

$sup_s$  is the capacity of supplier  $s$  for raw material,  $W_j$  is distribution capacity of DC  $j$ ,  $d_i$  is the demand for the product at customer  $i$ ,  $c_{ji}$  is the unit transportation cost for the product from DC  $j$  to customer  $i$ ,  $a_{kj}$  is the unit transportation cost for the product from plant  $k$  to DC  $j$ ,  $t_{sk}$  is the unit transportation and purchasing cost for the raw material from supplier  $s$  to plant  $k$ ,  $c_h$  is the holding cost per year at DC  $j$ ,  $S$  is ordering cost to manufacturer  $k$  from each of DCs.

**2.2 Objective Function, Constraints.**

$f_1$  is the total cost of SCN. It includes the variable costs of transportation raw material from suppliers to manufacturers and the transportation the product from plants to customers through DCs.

$f_2$  is annual holding and ordering cost of products in DCs according to the economic order quantity (EOQ) model.

$f_3$  is the equity of the capacity utilization ratio for manufacturers and DCs, and it is measured by mean square error (MSE) of capacity utilization ratios. The smaller value is, the closer the capacity utilization ratio for every manufacturer and DC is, thus ensuring the demand are fairly distributed among the DCs and manufacturers, and so it maximizes the capacity utilization balance.

$$\text{Minimize } f_1 = \sum_s \sum_k t_{sk} b_{sk} + \sum_k \sum_j a_{kj} f_{kj} + \sum_j \sum_i c_{ji} q_{ji} ; \quad (1)$$

$$\text{Minimize } f_2 = \sum_j \left[ \frac{S \sum_k f_{kj}}{\sqrt{\frac{\sum_k 2S f_{kj}}{k}}} + \frac{c_h \sqrt{\frac{\sum_k 2S f_{kj}}{k}}}{c_h} \right] ; \quad (2)$$

$$\text{Minimize } f_3 = \sqrt{\frac{\sum_k [(\sum_j f_{kj} / D_k) - (\sum_k \sum_j f_{kj} / \sum_k D_k)]^2}{\sum_k}} + \sqrt{\frac{\sum_j [(\sum_i q_{ji} / W_j) - (\sum_j \sum_i q_{ji} / \sum_i W_i)]^2}{\sum_j}} ; \quad (3)$$

$$\sum_j y_{ji} = 1 \quad \forall i, \quad (4)$$

$$\sum_j d_i y_{ji} \leq W_j \quad \forall j, \quad (5)$$

$$q_{ji} = d_i y_{ji} \quad \forall i, j, \quad (6)$$

$$\sum_k f_{kj} = \sum_i q_{ji} = \quad \forall j, \quad (7)$$

$$\sum_k b_{sk} \leq \sup_s \quad \forall k, \quad (8)$$

$$\sum_j f_{kj} \leq \sum_s b_{sk} \quad \forall k, \quad (9)$$

$$\sum_j f_{kj} \leq D_k \quad \forall k, \quad (10)$$

$$y_{ji} = \{0, 1\} \quad \forall i, j, \quad (11)$$

$$b_{sk} f_{kj} q_{ji} \geq 0 \quad \forall i, j, k, s. \quad (12)$$

The model is composed of three objective functions (Eq. 1–3). The first objective function (Eq. 1) defines minimizing shipment costs between suppliers, manufacturers, DCs and customers. The second objective function is minimizing

holding and ordering costs in DCs using economic order quantity model (Eq. 2). Equation 3 (third objective) minimizes equity of the capacity utilization ratio of manufacturers and DCs.

Constraint (Eq. 4) represents the unique assignment of a DC to a customer, (Eq. 5) is the capacity constraint for DCs, (Eq. 6) and (Eq. 7) gives the satisfaction of customer and DCs demands for the product, (Eq. 8) gives the supplier capacity constraint, (Eq. 9) describes the raw material supply restriction, (Eq. 10) is the manufacturer production capacity constraint. Finally, constraints (Eq. 11) and (Eq. 12) are integrality constraints.

### 3. NUMERICAL EXAMPLE

In this section we present a numerical example to illustrate the proposed model mentioned in previous section. The application of the model is performed for a logical data which was inspired from related cases in the real world. The considered supply chain network includes five suppliers which are located different places, three manufacturers, three distribution centers and four customers (Fig. 2). The network is structured to supply raw materials and transport products from suppliers to end-users is constituted from multi echelon and capacitated elements of network considering minimizing the total transportation costs between all echelons (suppliers, manufacturers, distribution centers (DCs) and customers, holding and ordering costs in DCs and unnecessary and unused capacity of plants and DCs via decreasing variance of transported amounts between echelons. Numerical data used in example are given below, respectively. Table 1 and 2 gives the priorities of objectives obtained by Expert Choice 11.5 program to find rate of purposes according to AHP methodology.

**Table 1.** Relatives of Objective Functions (AHP)

	$f_1$	$f_2$	$f_3$
$f_1$	1	2	3
$f_2$	1/2	1	3/2
$f_3$	1/3	2/3	1
<b>Sum</b>	1.83	3.67	5.5

**Table 2.** Normalized AHP Matrix

	$f_1$	$f_2$	$f_3$
$f_1$	0.545	0.545	0.545
$f_2$	0.273	0.273	0.273
$f_3$	0.182	0.182	0.182

According to Table 2, weight of each objective function is 0.542, 0.273 and 0.182 respectively. Because of matrix consistency  $< 0.1$ , this matrix will be accepted. Parameters: Number of Total Suppliers: 5; Number of Total Customers: 4; Number of Total Manufacturers: 3; Number of Total Distribution Centers: 3;  $S$  20 tl;  $C_h$  1,5 tl.

**Table 3.** Unit transportation costs values between suppliers and manufacturers (TL)

Manufacturers	Suppliers				
	1	2	3	4	5
1	0.5	0.3	0.4	0.4	0.5
2	0.6	0.4	0.5	0.6	0.6
3	0.5	0.5	0.6	0.6	0.4

**Table 4.** Unit transportation costs values between manufacturers and DCs (TL)

DCs	Manufacturers		
	1	2	3
1	1.4	1.1	1.1
2	1.1	1.2	0.8
3	1.3	1.4	0.9

**Table 5.** Unit transportation costs values between DCs and Customers (TL)

Customers	DCs		
	1	2	3
1	0.9	0.9	0.7
2	0.7	0.6	0.6
3	0.8	0.5	0.7
4	0.6	0.9	0.8

**Table 6.** Capacities of Suppliers, Manufacturers, DCs and Demands of Customers (unit)

	Suppliers	Manufacturers	DCs	Customers
1	5000	7000	6300	3100
2	5500	6500	6700	3100
3	5250	6500	6000	3100
4	4750	–	–	3100
5	4500	–	–	–

**Table 7.** The results obtained by LINGO package program

Decision	Value	Decision	Value
$X_{1,3}$	2000	$Y_{3,2}$	3400
$X_{2,1}$	2400	$Y_{3,3}$	3100
$X_{2,2}$	3100	$Z_{1,4}$	3100
$X_{3,1}$	400	$Z_{2,2}$	3100
$X_{5,3}$	4500	$Z_{2,3}$	3100
$Y_{1,2}$	2800	$Z_{3,1}$	3100
$Y_{2,1}$	3100	Objective (tl)	13678

According to data obtained LINGO package program, results are given above table 7. Under capacity constraint and transportation costs, decision maker

purchased raw materials from all suppliers except fourth. 2000 units from first suppliers, 5500 units from second supplier, 400 units from third and 4500 units from fifth supplier, are transported to manufacturers. 2800 units which come from second and third supplier are shipped to second DC from first manufacturer. Also 3100 units of product are transported from second manufacturer to first DC. 3400 units to second DC and 3100 units to third DC totally 4460 units of product shipped from third manufacturer. Supporting equation 4 constraint, each customer provided their demand only one DC via providing a better balanced distribution. All customers' demand is supplied from DCs as 3100, 6200 and 3100 units respectively (Fig. 3). At three echelons, all transportation costs and holding/ordering costs in DCs (first and second objective functions) calculated about 13678tl. Providing the third objective, the unnecessary and unused capacity of plants and DCs are minimized via decreasing variance of transported amounts between second and third echelons. When we examined the second and third echelons' distribution, it's seen that the transportation between manufacturers-DCs-customers come and go from 2800 units to 3400 units considering balancing distribution.

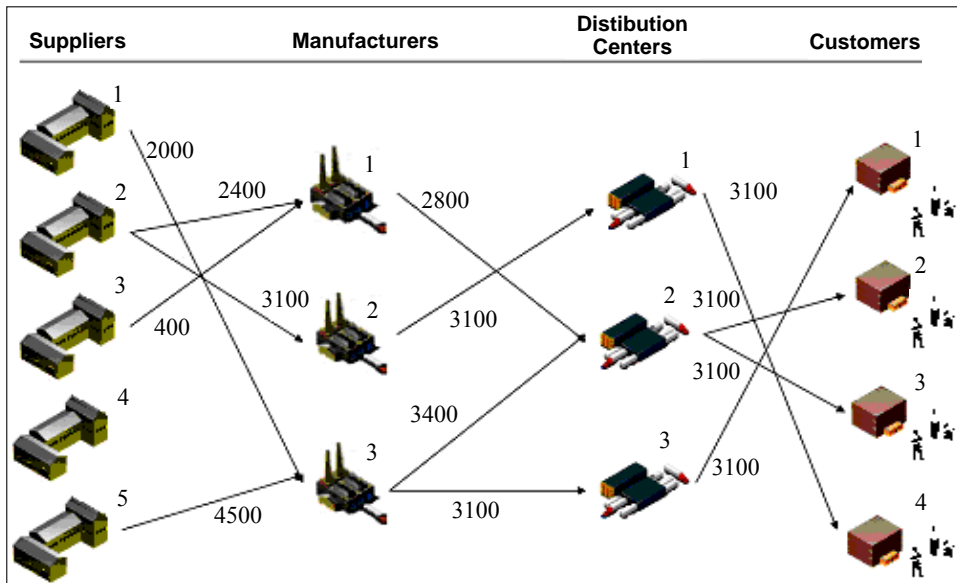


Fig. 3. Raw Material and Product flow

#### 4. CONCLUSION

In this study, a mixed integer non-linear programming model is developed to design a supply chain network by combining three different objectives. Considered three objectives: (1) minimization of total transportation cost of plants and distribution centers (DCs), inbound and outbound distribution costs, (2) minimization of holding and ordering costs via EOQ method (3) maximization of capacity utilization balance for DCs (i.e. equity on utilization ratios). We used the developed model to determine from which suppliers, manufacturers, DCs and how much amounts will be transported to answer customers demand. We developed binary variables to provide a DC for a customer. So we have prevented unbalanced distributions between DCs and customers.

In future, new solution methodology based on tabu search or heuristic methods can be developed to obtain new optimal solutions for the multi-objective SCN design problem, and the effectiveness of the solution methodology can be investigated. Additionally, uncertainty of costs and demands can be considered in the model and new solution methodologies including uncertainty can be developed via fuzzy models.

## REFERENCES

1. *Ahumada O., Villalobos J.R.* Application of planning models in the agri-food supply chain: a review // *European Journal of Operational Research*. — 2009. — **196** (1). — P. 1–20.
2. *Altıparmak F., Gen M., Lin L., Paksoy T.* A genetic algorithm approach for multi-objective optimization of supply chain Networks // *Computers and Industrial Engineering*. — 2006. — **51**. — P. 197–216.
3. *Chen L., Lee W.* Multi objective optimization of multi echelon supply chain networks with uncertain product demands and prices // *Computers and Chemical Engineering*. — 2004. — **28**. — P. 1131–1144.
4. *Cohen M.A., Lee H.L.* Resource deployment analysis of global manufacturing and distribution networks // *Journal of Manufacturing and Operations Management*. — 1989. — **2**. — P. 81–104.
5. *Gen M., Syarif A.* Hybrid genetic algorithm for multi-time period production distribution planning // *Computers and Industrial Engineering*. — 2005. — **48**. — P. 799–809.
6. *Gong Q., Lai K.K., Wang S.* Supply chain networks: Closed Jackson network models and properties // *International Journal of Production Economics*. — 2008. — **113**. — P. 567–574.
7. *Gumus A.T., Guneri A.F., Keles S.* Supply chain network design using an integrated neuro-fuzzy and MILP approach: A comparative design study, *Expert Systems with Applications*, doi:10.1016/j.eswa.2009.05.034. — 2009.
8. *Gunasekaran A., Ngai E.* Modeling and analysis of build-to-order supply chains // *European Journal of Operational Research*. — 2009. — **195** (2). — P. 319–334.
9. *Lin L., Gen M., Wang X.* A hybrid genetic algorithm for logistics network design with flexible multistage model // *International Journal of Information Systems for Logistics and Management*. — 2007. — **3** (1). — P. 1–12.
10. *Nagurney A., Toyasaki F.* Reverse supply chain management and electronic waste recycling: a multitiered network equilibrium framework for e-cycling // *Transportation Research. Part E*. — 2005. — P. 1–28.
11. *Narasimhan R., Mahapatra S.* Decision models in global supply chain management // *Industrial Marketing Management*. — 2004. — **33**. — P. 21–27.
12. *Ozdamar L., Yazgaç T.* Capacity driven due date settings in make-to-order production systems // *International Journal of Production Economics*. — 1997. — **49** (1). — P. 29–44.
13. *Paksoy T.* Distribution network design and optimization in supply chain management: under material requirements constraints a strategic production-distribution model // *Journal of Selcuk University Social Sciences Institute*. — 2005. — **14**. — P. 435–454, in Turkish.
14. *Petrovic D., Roy R., Petrovic R.* Supply chain modeling using fuzzy sets // *International Journal of Production Economics*. — 1999. — **59**. — P. 443–453.
15. *Pyke D.F., Cohen M.A.* Performance characteristics of stochastic integrated production distribution systems // *European Journal of Operational Research*. — 1993. — **68** (1). — P. 23–48.



16. *Schütz P., Tomaszgard A., Ahmed S.* Supply chain design under uncertainty using sample average approximation and dual decomposition // *European Journal of Operational Research*, doi:10.1016/j.ejor.2008.11.040. — 2008.
17. *Shin H., Benton W.C., Jun M.* Quantifying suppliers' product quality and delivery performance: A sourcing policy decision model // *Computers & Operations Research* 2009. — **36**. — P. 2462–2471.
18. *Sourirajan K., Ozsen L., Uzsoy R.* A genetic algorithm for a single product network design model with lead time and safety stock considerations // *European Journal of Operational Research*. — 2009. — **197** (2). — P. 599–608.
19. *Syarif A., Yun Y., Gen M.* Study on multi-stage logistics chain network: a spanning tree-based genetic algorithm approach // *Computers and Industrial Engineering*. — 2002. — **43** (1). — P. 299–314.
20. *Tuzkaya U., Önüt S.* A holonic approach based integration methodology for transportation and warehousing functions of the supply network // *Computers and Industrial Engineering*. — 2009. — **56**. — P. 708–723.
21. *Wang H.S.* A two-phase ant colony algorithm for multi echelon defective supply chain network design, *European Journal of Operation Research*, doi: 10.1016/j.ejor.2007.08.037. — 2007.
22. *Williams J.F.* Heuristic techniques for simultaneous scheduling of production and distribution in multi-echelon structures: theory and empirical comparisons // *Management Science*. — 1981. — **27** (3). — P. 336–352.
23. *Xu N., Nozick L.* Modeling supplier selection and the use of option contracts for global supply chain design // *Computers & Operations Research*. — 2009. — **36**. — P. 2786–2800.
24. *Yan H., Yu Z., Cheng T.C.E.* A strategic model for supply chain design with logical constraints: formulation and solution // *Computers & Operations Research*. — 2003. — **30** (14). — P. 2135–2155.
25. *Yilmaz P.* Strategic level three-stage production distribution planning with capacity expansion, Unpublished Master Thesis // Sabancı University Graduate School of Engineering and Natural Sciences. — 2004. — P. 1–20, in Turkish.
26. *You F., Grossmann E.* Design of responsive supply chain under demand uncertainty // *Computers & Chemical Engineering*. — 2008. — **32** (12). — P. 3090–3111.

*Received 27.10.2009*

---

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

## **ИНСТРУМЕНТАРИЙ МИНИМИЗАЦИИ РИСКА ЗАЩИЩЕННОСТИ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМАХ (РКС)**

**В.Е. МУХИН**

Разработана структура средств минимизации риска защищенности распределенных компьютерных систем, выполнена формализация функционирования основных блоков предложенной структуры. Предложена оценка уровня угроз безопасности, интегральная оценка ущерба вследствие атак на уязвимости, а также оценка степени риска реализации угроз безопасности в компьютерных системах. Также предложен подход к анализу риска на основе оценок степени опасности факторов угроз безопасности и вероятности реализации угроз безопасности с разделением их на соответствующие группы, а также на основе построения специальной матрицы рисков защищенности для минимизации риска защищенности.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Широкое внедрение и использование информационных технологий в настоящее время стало неотъемлемым фактором развития современного общества. РКС значительно повышают эффективность информационной составляющей в деятельности организаций, но в то же время, становятся одним из наиболее уязвимых компонентов, притягивая к себе внимание злоумышленников.

Актуальность проблемы обеспечения безопасности компьютерных систем возрастает в связи с рядом объективных причин. В частности, по отношению к распределенным компьютерным системам должен быть обеспечен высокий уровень доверия, т.к. в них хранится и обрабатывается ценная и конфиденциальная информация, которая представляет собой реальную ценность для ее владельца [1, 2]. Несанкционированный доступ к данной информации, в частности, ее разрушение или модификация, может привести к серьезному ущербу. Таким образом, обеспечение информационной безопасности РКС является чрезвычайно важной проблемой.

Современные РКС имеют сложную структуру. Увеличение количества используемых системно-технических платформ и широкий набор сетевых сервисов приводит к расширению списка уязвимостей и повышает требования к средствам защиты. Использование стандартных средств защиты, такие как межсетевые экраны и средства защиты от несанкционированного доступа, является необходимым, но уже не достаточным условием построения надежной и эффективной системы информационной безопасности.

В результате, для снижения уровня уязвимости РКС от внутренних и внешних атак и, в конечном счете, для избежания потерь важной информации, необходимо применение дополнительных механизмов защиты информации [3].

Одним из таких механизмов являются средства анализа риска защищенности в РКС. Анализ риска защищенности позволяет всесторонне исследовать информационную систему исследуемого объекта, оценить текущий уровень его информационной безопасности, выявить уязвимые места в системе защиты, создать модели возможных угроз РКС, проверить правильность подбора и настройки средств защиты [4].

Под риском понимается вероятность наступления нежелательного события, ведущего к потерям, в данном случае потерям информации, а также величина ущерба ввиду несанкционированного доступа к ней. Анализ риска защищенности подразумевает выполнение оценки степени риска и величины ущерба в случае осуществления того или иного варианта несанкционированных действий (НСД), выполняемых по специальным методикам [5].

В процессе проведения анализа риска защищенности РКС анализируются технологические потоки как электронной, так и бумажной информации, топология связей между узлами в системе, выявляются незащищенные или некорректные соединения, проводится анализ настроек межсетевых экранов и других средств защиты. Результатом данного анализа является ряд организационных документов, которые в дальнейшем могут явиться основой для построения надежной РКС [1].

Также в процессе анализа риска изучаются компоненты РКС, которые могут подвергнуться угрозам, определяются уязвимые места системы, оцениваются вероятность реализации каждой конкретной угрозы и возможные размеры потерь, выбираются возможные методы защиты и оцениваются их стоимость. На заключительном этапе оценивается эффективность применения предлагаемых средств защиты [6].

В результате, на основе анализа риска защищенности, принимается решение о целесообразности тех или иных мер и средств защиты, которые представляются в специальном документе, определяющем политику безопасности в данной РКС.

## **СРЕДСТВА МИНИМИЗАЦИИ РИСКА ЗАЩИЩЕННОСТИ**

Рассмотрим общую структуру средств минимизации риска защищенности. Данная структура состоит из восьми основных блоков: задания целей, оценки угроз безопасности, оценки уязвимостей, анализа риска защищенности, выбора вариантов реакции (на потенциальные атаки), принятия решения, реакции и мониторинга состояния РКС.

Блоки задания целей, оценки угроз безопасности и оценки уязвимостей выполняют предварительный сбор информации о состоянии безопасности РКС и обеспечивают данные для следующих стадий процесса оценки риска защищенности. Блок анализа риска защищенности является фактически ключевым, поскольку он определяет текущий уровень риска, его критичность, а также факторы, позволяющие снизить риск защищенности. Следующие четыре блока определяют возможные варианты реакции на потенциальные вторжения, принимают решение и непосредственно реагируют на атаки, а также осуществляют модификацию параметров средств защиты РКС и мониторинг их состояния.

Рассмотрим особенности реализации блоков данной структуры.

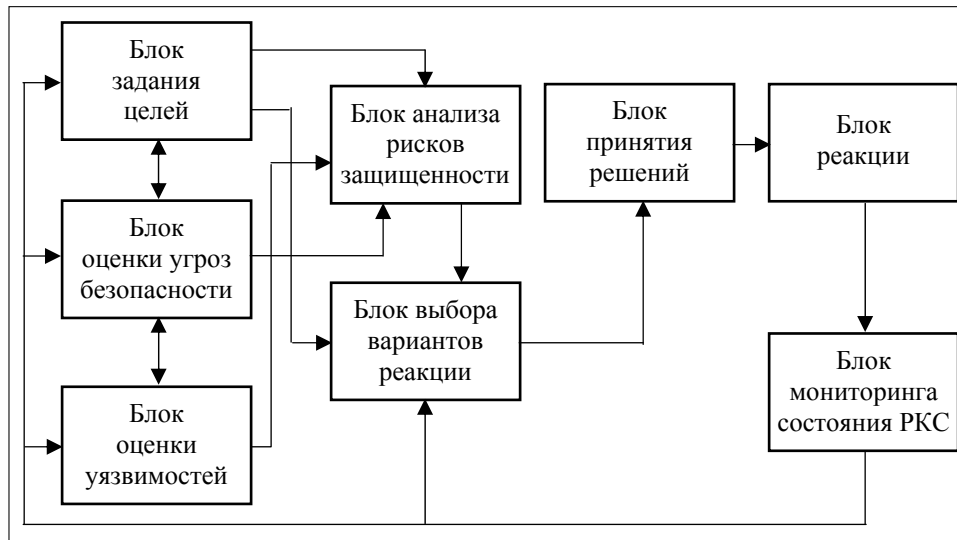


Рис. 1. Структура средств, реализующих минимизацию риска защищенности РКС

### Блок задания целей

В данном блоке определяются параметры, по которым будет проводиться анализ и минимизация риска защищенности РКС. В большинстве случаев эти параметры задаются администратором безопасности, который должен постоянно выявлять потенциальные угрозы, уязвимости и оценивать риски.

Блока анализа целей представляется целевой функцией  $f$ :

$$f = f(s_i, a_i, g_i), \quad (1)$$

где  $s_i$  — субъект-инициатор события,  $a_i$  — параметры действий субъекта,  $g_i$  — возможные цели. В свою очередь, параметры действий субъекта  $a_i$  представляются в виде кортежа данных:

$$a_i = f'(\{t_1, \dots, t_c\}, \{l_1, \dots, l_d\}, \{r_1, \dots, r_e\}, \{\gamma_1, \dots, \gamma_f\}), \quad (2)$$

где  $t_i$  — время события,  $l_i$  — место события,  $r_i$  — используемые средства,  $\gamma_i$  — степень опасности события.

Определенные в данном блоке параметры используются в других блоках системы минимизации риска защищенности.

### Блок оценки угроз безопасности

Под угрозой безопасности понимается возможность (вероятность) того, что злоумышленник может совершить несанкционированный доступ к ресурсам РКС. В целом, все угрозы безопасности подразделяются на угрозы модификации или кражи критичных данных, угрозы нарушения функционирования системного программного обеспечения РКС, а также угрозы, косвенно ведущие к реализации несанкционированного доступа [7].

Блок оценки угроз безопасности выполняет общий анализ возможных угроз РКС, сгруппированных по классам. Для повышения корректности

реалізації данної процедури часто потребуються значительні затрати [8]. Слідуеть відзначити, що оцінка загроз не дозволяє безпосередньо оцінити рівень ризику захищеності РКС, но в данному блоці формуються данні і рішення, котрі використовуються при аналізі ризику.

Оцінка загроз безпеки включає дві складові: ситуаційний аналіз і виявлення загроз.

*Ситуаційний аналіз* представляє собою детальний аналіз параметрів функціонування апаратно-програмного забезпечення РКС, в тому числі параметрів застосовуваних засобів забезпечення безпеки. При проведенні даного аналізу цілесообразно сгрупувати однотипні данні і оцінювати їх окремо по кожній групі.

*Виявлення загроз* передбачає комплексний і детальний аналіз всіх факторів, котрі можуть оказувати вплив на безпеку функціонування РКС. Загрози розділяються на три базові групи: «потенціальні» — дії, котрі теоретично можуть представляти небезпеку; «реальні» — дії злоумисленників по НСД; «направлені» — те, котрі направлені на реалізацію конкретних уязвимостей в апаратно-програмному забезпеченні РКС.

Ефективний рівень  $TL_j$  загрози безпеки від  $j$ -го порушителя пропонується розраховувати як:

$$TL_j = \omega_1 * LP_j + \omega_2 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{ij}, \quad (3)$$

де  $LP_j$  — потенціальний рівень загрози порушителя;  $F_{ij}$  — коректуючі фактори із специфікації моделі порушителя;  $n$  — кількість досліджуваних факторів;  $\omega_1, \omega_2$  — вагові коефіцієнти, регулюючі вагу кожного складового в  $TL_j$ , причому  $\omega_1 + \omega_2 = 1$ . В тому випадку, якщо окремий фактор для певної досліджуваної категорії порушителя має декілька значень, для розрахунків використовується середнє значення цього фактора. Під потенціальним рівнем загрози порушителя  $LP_j$  розуміються його загальні можливості в цілому, в відмінність від конкретних можливостей  $TL_j$  для конкретної РКС.

Для розрахунку і корекції параметрів  $\omega_1, \omega_2, F_{ij}, LP_j$  використовуються данні блоку завдання цілей.

### **Блок оцінки уязвимостей**

В данному блоці виявляються уязвимості, т.е. потенціальні можливості для злоумисленника отримати несанкціонований доступ до системи, котрий призводить до певного збитку апаратно-програмного забезпечення РКС і оброблюваних в ній даних.

Оцінка уязвимостей включає дві складові: виявлення уязвимостей і визначення факторів, зменшуючих ризик реалізації уязвимостей в системі безпеки РКС.

*Виявлення уязвимостей.* Уязвимость розглядається як потенціальний канал реалізації загрози, т.е. це слабкі місця (т.н. «діри») в існуючих засобах безпеки РКС. В якості факторів, сприяючих

щих появлению уязвимостей могут, в частности, выступать: незащищенные ресурсы или ресурсы с низким уровнем защищенности, неэффективные средства защиты, некорректные действия по предотвращению угроз, низкая квалификация администраторов безопасности, потенциальные ошибки в системном программном обеспечении и т.д.

*Определение факторов, снижающих риск реализации уязвимостей.* К их числу относятся те факторы, которые могут уменьшить вероятность реализации уязвимостей РКС. Например, в качестве таких факторов выступают: эффективная система защиты РКС; высокая квалификация администраторов безопасности; средства мониторинга, которые предупреждают опасные действия; система адаптивного управления безопасностью и т.д.

Анализ уязвимостей РКС предусматривает необходимость участия администратора безопасности, поскольку он может влиять на многие факторы, связанные с уязвимостью системы.

Существует шесть основных факторов, которые влияют на уязвимости РКС: местонахождение уязвимости, степень открытости РКС, ценность обрабатываемой информации, влияние особенностей РКС, применение адекватных мер и средств защиты, квалификация администраторов безопасности.

Введем понятие уязвимости I и II типа. К I-му типу относятся такие уязвимости, которые потенциально предотвращаются реализованными в системе средствами защиты, а ко II-му — те, которые не предотвращаются даже потенциально. Сформируем интегральную оценку  $C$ , характеризующую потенциальный суммарный ущерб вследствие реализации атаки на уязвимости РКС:

$$C = \sum_{i=1}^N \frac{UI_i}{U} + \sum_{j=1}^M K_j * \frac{UII_i}{U}, \quad (4)$$

где  $UI$  — количество пользователей, скомпрометированных в результате атаки на уязвимость типа I;  $N$  — количество уязвимостей типа I;  $UII$  — количество пользователей, скомпрометированных в результате атаки на уязвимость типа II;  $M$  — количество уязвимостей типа II;  $U$  — общее количество пользователей в системе;  $K_j$  — коэффициент, характеризующий уязвимость типа II.

Для получения данной оценки необходимо для каждой обнаруженной уязвимости:

- определить тип уязвимости;
- если уязвимость имеет тип II, то с помощью экспертных оценок определить последствия данной уязвимости и рассчитать коэффициент  $K_j$ ;
- оценить количество пользователей, на которых могут быть произведены атаки по использованию уязвимостей типа I и II, по отношению к общему количеству пользователей в системе.

### **Блок анализа риска защищенности**

Анализ риска защищенности представляет собой оценку вероятности реализации несанкционированных действий путем использования уязвимостей в системе безопасности. Данный анализ требует комплексного учета всех факторов, связанных с угрозами безопасности РКС. При этом следует отме-

тять, що, в тому випадку, якщо існуюча загроза безпеки є серйозною, але ймовірність її реалізації є низкою (т.е. її вплив на безпеку РКС оцінюється як незначительне), то рівень ризику захищеності також вважається низким.

Аналіз ризику захищеності включає дві складові: ймовірність реалізації загроз безпеки та оцінку ступеня шкоди внаслідок реалізації загроз безпеки.

Для оцінки ступеня шкоди внаслідок реалізації загроз безпеки фактори розділяються на групи, які відображають ступінь їх небезпечності відносно до ресурсів РКС. При цьому фактори з низким рівнем небезпечності розглядаються як не небезпечні, а фактори з високою ступенем небезпечності обов'язково повинні бути нейтралізовані.

Групи факторів загроз безпеки за ступенем їх небезпечності розподіляються таким чином: критична, висока, середня, низка та незначительна.

Віднесення факторів загроз безпеки до певної групи ступеня ризику проводиться на основі експертних оцінок та попередньої статистичної інформації про функціонування РКС.

Ймовірність реалізації загроз безпеки також знаходиться в одній з груп, які відображають ступінь можливості реалізації загроз безпеки.

Можливості реалізації загроз безпеки групуються на основі попередньої статистичної інформації про функціонування системи безпеки РКС. Виділяються наступні ступені можливості реалізації загроз безпеки: практично неможливо, малоймовірно, ймовірно, високоймовірно, практично неминуче.

Для оцінки ризику реалізації загрози від порушників пропонується використовувати функцію  $TR$ , що характеризує можливість реалізації цієї загрози:

$$TR = \frac{1}{m} * \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n K_{ij} PE_j = \frac{1}{m} * \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n K_{ij} PB_j TL_j, \quad m \leq n, \quad (5)$$

де  $K_{ij} = 0$ , якщо на  $i$ -м місці в переліку суб'єктів загрози не представлений  $j$ -й злоумисленник (не небезпечний фактор),  $K_{ij} = 1$ , якщо на  $i$ -м місці в переліку суб'єктів загрози представлений  $j$ -й злоумисленник (небезпечний фактор),  $m$  — кількість небезпечних суб'єктів,  $n$  — загальна кількість всіх суб'єктів,  $PE_j$  — ефективна ймовірність реалізації загрози,  $PB_j$  — базова ймовірність реалізації загрози, т.е. загальновідома або загальноприйнята ймовірність конкретної загрози.

Величина можливого шкоди від реалізації загрози визначається таким чином:

$$PL_j = c_j \sum_{k=1}^3 K_{ki} A_k, \quad (6)$$

де  $A_k$  — апріорні вимоги до забезпечення трьох основних властивостей захищеної інформації: конфіденційність, цілісність та доступність. Ці вимоги можуть бути виражені по відносній шкалі, при

этом  $K_{ki} = 0$ , если данная угроза не влияет на  $k$ -е свойство информации,  $K_{ki} = 1$ , если данная угроза влияет на  $k$ -тое свойство информации, а  $c_i$  — нормирующий коэффициент.

Таким образом, величина риска реализации угрозы безопасности  $R$  в РКС рассчитывается как:

$$R = \left( \frac{1}{m} * \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n K_{ij} PB_j TL_j \right) \left( c_i \sum_{k=1}^3 K_{ki} A_k \right). \quad (7)$$

Представленный подход позволяет оценить влияние различных факторов на формирование количественных значений эффективного уровня риска и сформулировать требования к мерам и средствам защиты.

**Матрица рисков защищенности.** Завершающая стадия анализа риска защищенности состоит в построении матрицы рисков. Данная матрица строится по двум основным параметрам, описывающим риски защищенности: степени опасности факторов угроз безопасности и вероятности реализации угроз безопасности (рис. 2).

Существующие риски защищенности располагаются в данной матрице рисков и им назначаются приоритеты, т.е. степени опасности как вероятности реализации угроз безопасности, при этом используются экспертные оценки. Всего выделяют четыре категории рисков защищенности: низкий, средний, высокий и сверхвысокий. Так, те риски, располагающиеся в правом верхнем квадранте матрицы рисков (рис. 2), рассматриваются как самые опасные риски. Важно отметить, что назначение категории рискам зависит от условий функционирования конкретной РКС. Конечной целью является перемещение всех возможных угроз безопасности РКС в левый нижний угол матрицы рисков защищенности.

Регулярное обновление матрицы рисков позволяет выявлять тенденции в среде защиты информации, а также позволяет оценить факт снижения или повышения риска защищенности РКС. Матрица рисков может использоваться как основа для разработки стратегий минимизации риска защищенности и для планирования возможных путей снижения вероятности реализации угроз безопасности РКС.

### **Блок выбора вариантов реакции (на потенциальную атаку)**

На этом этапе администратор безопасности определяет комплекс механизмов для обеспечения безопасности и защищенности РКС. Выбор механизмов защиты должен основываться на анализе в реальном режиме времени критичных параметров безопасности и на анализе риска защищенности РКС. Возможными вариантами реакции на атаки злоумышленников являются: использование существующих средств защиты в неизменном виде; перенастройка параметров существующих средств защиты; добавление и изменение конфигурации существующих средств защиты; приостановка функционирования или отключение тех средств защиты, которые не являются необходимыми в данный момент.

Некоторые из перечисленных выше вариантов реакции на атаки могут вызвать существенное увеличение аппаратно-программных затрат, что, в свою очередь, может снизить производительность РКС [8]. Данный фактор



необходимо учитывать при выборе того или иного варианта реакции. Также следует учитывать, что обеспечение требуемого уровня безопасности обработки критичной информации всегда имеет наивысший приоритет при выборе вариантов реакции на потенциальные атаки.



Рис. 2. Матрица рисков защищенности РКС

### Блок принятия решения

Данный блок реализует две основные функции.

Во-первых, здесь принимаются решения по приоритетным направлениям выявления угроз безопасности и уязвимостей РКС. Часто оказывается, что спектр угроз безопасности является весьма широким, поэтому сложно обеспечить оперативную реакцию на все актуальные угрозы. Прежде всего, необходимо выявить наиболее опасные угрозы и нейтрализовать их за минимальный промежуток времени. В том случае, если критичные угрозы не удастся нейтрализовать оперативно, возможно, требуется принять решение о временной приостановке функционирования РКС или ее отдельных сегментов.

Во-вторых, на данном этапе необходимо определить требуемые аппаратно-программные ресурсы и оценить соответствующие затраты на реализацию противодействия угрозам безопасности РКС для выбора эффектив-

ных средств защиты информации, в частности, по критерию цена/качество. Качество средств защиты информации определяется, прежде всего, такими параметрами, как обеспечиваемая ими степень защиты и аппаратно-программные затраты на их реализацию.

Для эффективного поиска решений используется алгоритм случайного поиска с предысторией [10].

Данный алгоритм представляется в виде следующих рекуррентных выражений:

$$\begin{aligned} \bar{X}_{i+1} &= \bar{X}_i + \Delta \bar{X}_{i+1}; \\ \bar{X}_i &= \bar{X}_{i-h} \text{ при } [f(\bar{X}_{i-1}) < f(\bar{X}_i)] \vee [f(\bar{X}_i) < 0], \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\bar{X}_i$  — вектор параметров целевой функции (таких, например, как длины ключей шифрования, которые во многом определяют уровень защищенности информации и т.д.) на  $i$ -том шаге поиска;  $h$  — число последовательно неудачных шагов поиска;  $\Delta \bar{X}_{i+1}$  — вектор приращений на  $i+1$ -м шаге поиска, который определяется как:

$$\Delta \bar{X}_{i+1} = \begin{cases} a\bar{R}_{i+1} & \text{при } (i=0) \vee (|\Delta \bar{X}_i| = |\Delta \bar{X}_{i-1}|) \wedge (h > 1), \\ \Delta \bar{X}_i & \text{при } [f(\bar{X}_{i-1}) \geq f(\bar{X}_i)] \wedge [f(\bar{X}_i) \geq 0], \\ -\Delta \bar{X}_i & \text{при } (|\Delta \bar{X}_i| \neq |\Delta \bar{X}_{i-1}|) \wedge (h \geq 1), \end{cases} \quad (9)$$

где  $a$  — максимальная величина рабочего шага поиска,  $\bar{R}_{i+1}$  — вектор случайных чисел, определяется как:

$$\begin{aligned} \bar{R}_{i+1} &= (0, \dots, 0, R_k^{i+1}, R_{k+1}^{i+1}, \dots, R_L^{i+1}, 0, \dots, 0), \\ R_k^{i+1} &= R_{k+1}^{i+1} = \dots = R_L^{i+1} = \psi, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\psi$  — случайно равномерно распределенные числа, выбираемые из интервала  $[-1, 1]$ ;  $k$  и  $L$  — случайные целые числа, распределенные на отрезке  $[1, h]$  и упорядоченные соотношением  $k \leq L$ ,  $f(\bar{X}_{i-1})$ ,  $f(\bar{X}_i)$ ,  $f(\bar{X}_{i+1})$  — значения параметров целевой функции после осуществления  $(i-1)$ -,  $i$ -,  $(i+1)$ -го шагов поиска.

Специфика предлагаемого алгоритма состоит в том, что в нем вводится окно истории, т.е. запоминается величина такого последнего шага по каждой переменной, который привел к требуемому изменению целевой функции. В данном алгоритме вначале используется сохраненное значение шага поиска и лишь в том случае, если оно не дает требуемого результата, выполняется расчет величины шага в соответствии с алгоритмом случайного поиска.

Эффективные решения по минимизации риска защищенности должны базироваться на учете требования постоянного снижения уровня существующих рисков защищенности ввиду возможных серьезных последствий при функционировании РКС в условиях высокого уровня риска их защищенности [1].

### Блок реакции (на угрозы безопасности)

Данный блок реализовывает реакцию средств защиты на угрозы безопасности и предотвращает несанкционированный доступ к РКС. Эффективная реакция на угрозы безопасности является результатом комплексного функционирования всех предыдущих и данного блока.

### Блок мониторинга состояния РКС

Для эффективного предотвращения угроз безопасности РКС необходимо проведение постоянного мониторинга существующих угроз, уязвимостей. Блок мониторинга состояния РКС является завершающим в предложенной структуре средств минимизации риска защищенности и координирует функционирование ряда структурных блоков. Общая схема системы мониторинга состояния РКС представлена на рис. 3 и включает в себя следующие модули: модуль сбора информации и проверки состояния системы; модуль формирования событий безопасности; модуль обнаружения вторжений; модуль реакции системы; модуль обновления шаблонов и классов.

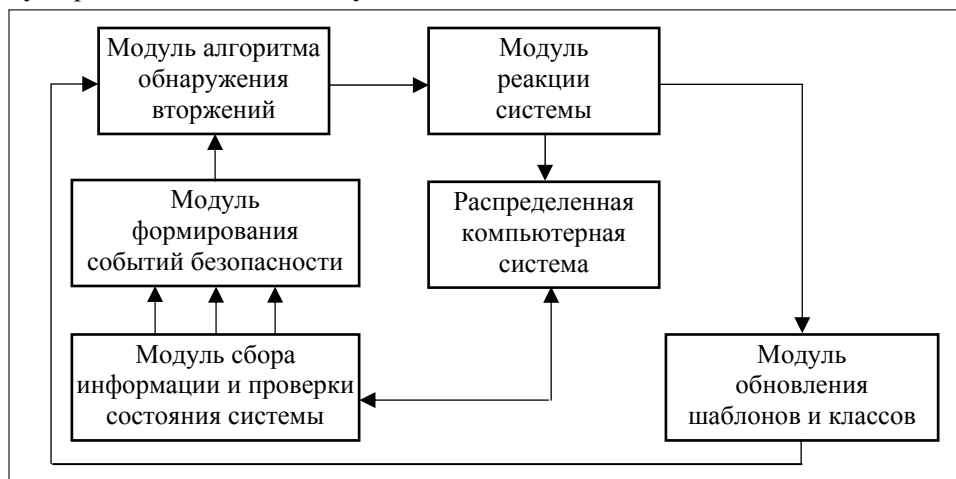


Рис. 3. Общая структура комплексной системы мониторинга состояния РКС

*Модуль сбора информации и проверки состояния системы*, в качестве которых системы выступают классические системы обнаружения вторжений, средства защиты (антивирусы, межсетевые экраны, аппаратные средства защиты и контроля доступа) и средства анализа защищенности РКС. Системы анализа защищенности проводят всесторонние исследования контролируемых ресурсов с целью обнаружения уязвимостей, которые способны привести к нарушению политики безопасности РКС.

*Модуль формирования событий безопасности* получает информацию от средств сбора информации и проверки состояний системы, выступающих в качестве агентов-приложений по специальному протоколу получения данных, в соответствии с которым выполняется преобразование журналов регистрации событий агентов-приложений во внутренний формат данных, использующийся в системе мониторинга безопасности.

*Модуль обнаружения вторжений* на первом этапе анализирует существующие причинно-следственные связи, указывающие на взаимосвязь между вторжениями, дифференцированными по времени, месту, способу атаки и задействованным средствам, а также формирует вероятностную зависимость между событиями, инициатор которых выявлен не был, и анализируемыми событиями.

Далее проводится автоматическое ранжирование по уровням опасности угроз действий нарушителя, на основе анализа возможного ущерба компьютерной системе. Основной задачей данного блока является формирование вероятностей вторжений злоумышленников в РКС и определение потенциальных целей нарушителей, а также прогнозирование их дальнейших действий.

Если воздействие на систему критично, то *Модуль реакции системы* производит автоматическую нейтрализацию действий злоумышленника. Если же степень угрозы не превышает пороговый уровень, то продолжается штатное функционирование системы.

*Модуль обновления шаблонов и классов* на основании информации о совершенных вторжениях и методах действия злоумышленника обеспечивает своевременное обновление шаблонов и сигнатур.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обеспечение безопасности РКС представляет собой комплекс мероприятий, включающий в себя, в частности, механизмы защиты аппаратно-программных средств и действия администратора безопасности по их применению. Известно, что абсолютную безопасность РКС обеспечить в принципе невозможно, однако возможно существенно снизить уровень угроз безопасности и риска защищенности системы. Для реализации данной задачи необходим формализованный процесс и соответствующие средства минимизации риска защищенности, рассмотренные в данной статье.

Предложенные средства минимизации риска защищенности имеют практическую направленность, учитывают требования к современным методам минимизации риска защищенности и позволяют эффективно выявлять, классифицировать и анализировать угрозы безопасности РКС, что обеспечивает повышение эффективности применения средств защиты информации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Медведевский И.Д., Петренко С.А., Нестеров С.А.* Руководство по управлению информационными рисками корпоративных информационных систем Internet/Intranet. — М.: «Domina Security», 2002. — 184 с.
2. *Maiwald E.* Fundamentals of network security. — New York: «McGraw-Hill. Technology Education», 2004. — 648 p.
3. *Hentea M.* Information security management. Encyclopedia of multimedia technology and networking. IDEA Group Reference. — Pennsylvania: «Hershey», 2005. — P. 390–395.
4. *Hentea M.* Enhancing information security risk management with a fuzzy model // Proceedings of 19<sup>th</sup> International Conference on Computer Application in Industry and Engineering. — Las Vegas, USA, 2006. — P. 132–139.
5. *Симонов С.В.* Технологии и инструментарий для управления рисками // Информационный бюллетень «Jet Info». — 2003. — № 2. — 32 с.
6. *Tassabehji R.* Information security threats. Encyclopedia of multimedia technology and networking. IDEA Group Reference Pennsylvania: «Hershey», 2005. — P. 404–410.
7. *Cardoso R.C., Friere M.M.* Security vulnerabilities and exposures in internet systems and services. Encyclopedia of multimedia technology and networking. IDEA Group Reference, Pennsylvania: «Hershey», 2005. — P. 910–916.
8. *Петренко С.А., Попов Ю.И.* Оценка затрат на информационную безопасность // Конфидент. Защита информации. — 2003. — № 1. — С. 45–52.
9. *Wang F.Y.* Agent-based control for networked traffic management systems // IEEE Intelligent Systems. — 2005. — № 5(19). — P. 92–96.
10. *Мухин В.Е., Павленко Е.Н.* Адаптивное управление безопасностью компьютерных систем на основе семиотических СППР с интеллектуальным агентом // Искусственный интеллект. — 2004. — № 4. — С. 785–793.

Поступила 26.11.2009

## **ТЕОРІЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ У ЗАДАЧАХ ОПТИМАЛЬНОЇ ЗУПИНКИ**

**М.В. АНДРЕЄВ**

Розглянуто правило оптимальних рішень виробника зі зростаючим запасом у даний період, коли задані поточна ціна та ймовірнісний розподіл цін наступного періоду. Побудовано моделі прийняття рішень у задачах оптимальної зупинки марковських послідовностей з детермінованою або випадковою переоцінкою. Наведено байесову процедуру прийняття рішень у задачі перевірки статистичних гіпотез.

### **ВСТУП**

Задача оптимальної зупинки полягає у виборі моменту зупинки, яка базується на послідовному спостереженні випадкових величин з метою отримання максимального очікуваного виграшу або мінімальних очікуваних втрат. Задачі такого типу мають місце в теорії статистичних рішень при мінімізації ризику від неправильно прийнятих рішень, при перевірці статистичних гіпотез або оцінюванні невідомих параметрів заданих ймовірнісних розподілів, у дослідженні операцій, коли рішенням може бути заміна устаткування, вибір секретаря, або регулювання рівня запасу для задоволення випадкового попиту тощо.

Історично, ця проблема виникла у послідовному аналізі статистичних спостережень у теорії Вальда [6], яка стосується послідовного критерію відношення ймовірностей для перевірки статистичних гіпотез та теорії статистичних рішень. Байєсів підхід до розв'язання проблем прийняття статистичних рішень в умовах стохастичної невизначеності вперше зустрічається у статті Арроу, Блекуелла та Гіршіка [2]. Важливе місце у розвитку і застосуванні ідей статистичного послідовного аналізу належить Ширяєву [11]. Узагальнення послідовного аналізу на проблеми чистої зупинки без статистичної структури реалізовано Снеллом [5]. У монографії Чао, Робінса та Сигмунда [10] підсумовується розвиток цих досліджень. У статтях автора [14–16] досліджено методи побудови оптимальних моментів зупинки для марковських послідовностей, процесів марковського відновлення та деяких задачах неполадки.

**Мета роботи** — визначити можливості застосувань методології теорії оптимальних рішень у задачах оптимальної зупинки деякої монотонної стохастичної послідовності, що описує динаміку зростання рівня «живого» за-

пасу, оптимальної зупинки марковських послідовностей з детермінованою або випадковою переоцінкою та оптимальної зупинки процесу спостережень при побудові байєсової процедури перевірки двох простих статистичних гіпотез. Для цих різних задач проводиться системний аналіз побудови моделей прийняття рішень на базі теорії оптимальних рішень із використанням досліджень, проведених у роботах Гохмана [3], Абдель-Хаміда [1], Андреева, Губенка і Штатланда [13] та Чао і Роббінса [12].

## **ПРАВИЛА ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В ЗАДАЧІ ОПТИМАЛЬНОЇ ЗУПИНКИ ЗРОСТАЮЧОГО РІВНЯ ЗАПАСУ**

Розглядається задача керування рівнем запасу, що зростає за віком на поточному періоді часу, коли задані поточна ціна та ймовірнісний розподіл цін на наступний період. Базова концепція підходу, що розглядається, полягає у знаходженні оптимального правила зупинки у цій задачі. З'ясовується, що оптимальна стратегія передбачає знаходження урізаної цінової функції, яка не є зростаючою відносно рівня зростання за віком наявного запасу.

Зростаючим за віком рівнем запасу може бути «живий» товар (домашня рогата худоба, птиця, ділянка будівельного лісу, засіяне поле і т.д.), за заданими поточною ціною на цей період та ймовірнісним розподілом цін для наступного періоду. Особа, що приймає рішення (ОПР) (виробник чи фермер) має вирішити необхідність продажу свого товару у даний період, або притримати його до наступного періоду. Варто зазначити, що час тут виступає на двох рівнях: 1) товар, що розглядається у часі, описується зростаючим процесом і 2) процес прийняття рішень за своєю природою реалізується впродовж цього часу. Важливим є і те, що оскільки рішення стосуються діяльності у майбутньому часі і процес рішень здійснюється на конкретних відрізках часу, то при цьому обов'язково має місце поява ризику. Навіть припускаючи, що фізичний процес зростання рівня запасу може контролюватись ОПР, ризик все одно залишається через неуможливлення ОПР повною мірою регулювати ціни в ринкових умовах.

Ця задача сформульована Гохманом [3], повністю відображає загалом проблем оптимальної зупинки, систематизовано представленої Чао, Робінсом та Сигмундом [10]. У розділі 5 цієї книги, автори досліджують проблему правил зупинки марковських процесів, зокрема, так звану проблему Елфвінга [4], для якої дана задача є її частковим випадком.

Оптимальна стратегія передбачає знаходження урізаної цінової функції, яка визначатиме для кожного рівня запасу наявного за віком товару його ціну, нижче якої фермер притримує свій товар на інший період, і вище якої — продає свій товар протягом поточного періоду. Для подальшого спрощення припустимо, що всі операції мають місце на початку періоду.

Стан системи визначається віком наявного товару. Наприклад, у випадку яловичини, за допомогою функції зростання встановлюється зв'язок ваги, якості і споживчого постачання за віком цього товару. Незважаючи на те, що поточні ринкові ціни відомо, а ціни для наступного періоду невідомо, можна припустити, що вони описуються випадковою величиною, яка має один і той же ймовірнісний розподіл упродовж усіх періодів. Ці ціни є незалежними від вікового рівня запасу товару, оскільки його вага «коригується» для змін якості за віком через функцію якості.

Нехай  $f(x, p)$  буде максимально очікуваною вигодою наявного запасу товару, вік якого дорівнює  $x$ , тоді як поточна ціна продажу одиниці його ваги дорівнює  $p > 0$ . Тоді

$$f(x, p) = \max [w(x)p, M f(x+1, p') - w(x)c(x)] \quad (1)$$

для  $x = 0, 1, \dots, X-1$  з крайовою умовою  $f(X, p) \equiv w(X)p$ , де  $w(x) > 0$  — вага товару, вік якого дорівнює  $x$ ,  $c(x)$  — вартість одиниці ваги утримання товару від віку  $x$  до віку  $x+1$ , а  $p'$  — випадкова майбутня ціна одиниці ваги, у випадку, коли вік товару дорівнює  $x+1$ . Якщо наразі ввести нові змінні

$$g(x, p) = f(x, p)/w(x) \text{ і } v(x) = w(x+1)/w(x) \quad (2)$$

для  $x = 0, 1, \dots, X-1$ , тоді рівняння (1) можна переписати у вигляді

$$g(x, p) = \max [p, Mv(x)g(x+1, p') - c(x)] \quad (3)$$

для  $x = 0, 1, \dots, X-1$  з крайовою умовою  $g(X, p) = p$ . Значення функції  $g(x, p)$  характеризує максимально очікувану вигоду від товару, вік якого дорівнює  $x$ , коли поточна ціна продажу одиниці ваги дорівнює  $p > 0$ . Для побудови моделі рішень для даної задачі слід зауважити, що оскільки умовний розподіл майбутньої ціни  $p'$  за заданої поточної ціни  $p$ , не залежить від  $p$ , тоді з рівняння (3) відразу випливає, що оптимальна стратегія прийняття рішень складається з двох рішень:

$$\begin{aligned} d(x) &\equiv 1: \text{ продавати товар, якщо } p > \rho(x), \\ d(x) &\equiv 0: \text{ притримати товар, якщо } p \leq \rho(x), \end{aligned} \quad (4)$$

де  $\rho(x) = v(x)Mg(x+1, p') - c(x)$  для  $x = 0, 1, \dots, X-1$ .

Це означає, що при прийнятті рішення притримати товар на один період довше, фермер прирівнює максимально можливі поточні витрати —  $w(x)[p + c(x)]$  до максимально очікуваної вигоди від продажу товару на наступному періоді —  $Mf(x+1, p')$ .

Можна показати, що коли  $c(x) \leq 0$  для усіх  $x$  та  $w(x)$  є зростаючою функцією по  $x$ , тоді  $\rho(x)$  не є зростаючою функцією по  $x$ . Але припущення щодо від'ємних витрат від утримання живого товару є такими, що потребують субсидування фермера, а це суперечить дійсності і є нереальними; тому слід зосередитись на умовах, які забезпечують лише додатні витрати від утримання живого товару, тобто  $c(x) > 0$ .

**Теорема 1.** [3] Якщо  $v(x)$  і  $-c(x)$  — не є зростаючими функціями по  $x$ , тоді такими самими є функції  $g(X, p)$  і  $\rho(x)$ .

**Доведення.** З огляду на визначення функції  $\rho(x)$  і допустимих властивостей функцій  $v(x)$ ,  $c(x)$  та  $g(X, p) > 0$ , досить показати, що  $g(x, p)$  не є зростаючою функцією по  $x$ . Для цього використовується метод індукції по  $x$ . З рівняння (3) випливає, що  $g(X-1, p) \geq p = g(X, p) \forall p > 0$ . Припустимо, що  $g(x+1, p) \geq g(x+2, p) \forall p$ . Тоді з рівняння (3) та умов теореми випливає, що  $g(x, p) \geq g(x+1, p) \forall p$ , що завершує доведення.

Цей результат пояснюється таким чином: для детерміністичного випадку, оптимальний вік або стан збуту на ринку однозначно визначається заданою поточною ціною. Це легко перевірити за умов теореми (коли функція  $w(x)$  має спадний до нуля маргінальний темп зростання і функція  $c(x)$  не є зростаючою функцією по  $x$ ), що зростання ринкової ціни призводить до зменшення оптимального віку або стану для збуту товару на ринку. З цього результату робимо висновок і для стохастичного випадку, що коли фермер вирішує продавати живий товар у віці  $x$  за будь-яку ціну, яка дорівнює або більша за  $\rho(x)$ , тоді можна очікувати, що «діапазон цін» залишиться в «діапазоні продаж» у віці  $x + 1$ .

Таким чином, задача зростаючого рівня запасу живого товару у цьому контексті розглядається як конкретний випадок задачі оптимальної зупинки. Ця задача може розглядатись в іншій постановці як проблема заміщення, яку можна розв'язати методами теорії дослідження операцій.

### **ЗАДАЧІ ОПТИМАЛЬНОЇ ЗУПИНКИ МАРКОВСЬКИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ З ДЕТЕРМІНОВАНОЮ ПЕРЕОЦІНКОЮ**

Зупинимось на з'ясуванні деяких рівностей для стаціонарних марковських послідовностей, які використовуються при обґрунтуванні процесу прийняття рішень щодо задач оптимальної зупинки. Надалі  $(\Omega, F, P)$  використовуватиметься для позначення ймовірнісного простору, а  $N = [0, 1, 2, \dots]$  та  $X = (X_n, n \in N)$  позначатиме стаціонарну марковську послідовність випадкових величин, визначених на  $(\Omega, F, P)$  зі значеннями у вимірному просторі  $(E, \xi)$ . Для кожного  $x \in E$  і  $A \in F$ ,  $P_x(A)$  позначатиме умовну ймовірність появи випадкової події  $A$  при заданому  $X_0 = x$ ,  $M_x$  — математичне сподівання відносно міри  $P_x$ . Кожна функція  $f$ , що використовується тут, буде скінченою і дійсно значною доти, поки не стверджується щось інше; крім того, припустимо, що для кожного  $n \in N$ ,  $M_x |f(X_n)| < \infty$ . Термін «час зупинки» означатиме «скінчений час зупинки». У роботі [10] автори подають вичерпну методологію теорії оптимальної зупинки.

### **МОДЕЛІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ У ЗАДАЧАХ ОПТИМАЛЬНОЇ ЗУПИНКИ ОДНОРІДНИХ МАРКОВСЬКИХ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ ІЗ ДЕТЕРМІНОВАНОЮ ПЕРЕОЦІНКОЮ**

При дослідженні задачі оптимальної зупинки однорідної марковської послідовності з детермінованою переоцінкою знаходять такий момент зупинки цієї послідовності, на якому досягається максимальне значення заданого критерію оптимальності з детермінованою переоцінкою. Декілька конкретних прикладів таких задач наведено у статті Абдель-Хаміда [1].

У цьому розділі розглядаються деякі рівності та нерівності для однорідної марковської послідовності з детермінованою переоцінкою, які використовуються в подальшому для отримання правил або моделей прийняття рішень у задачах оптимальної зупинки з переоцінкою.



Нехай для однорідної марковської послідовності  $(X_n, F_n, P_x)$  з ФПС  $(\mathbf{X}, \mathbf{V})$  та двох  $\mathbf{V}$ -вимірних функцій  $g, c$  та сталої величини (фактора переоцінки)  $\alpha, 0 < \alpha < 1$ , функція виграшу в момент зупинки  $\tau$  має вигляд

$$M_x \left[ \alpha^\tau g(X_\tau) - \sum_{n=0}^{\tau-1} \alpha^n c(X_n) \right], \quad (5)$$

де  $g$  трактується як функція виграшу, а  $c$  — як функція плати за одне спостереження.

Нехай  $\mathbf{F}$  — клас усіх марковських моментів, що задовольняють умові

$$\lim_{m \rightarrow \infty} M_x \left\{ \left[ \sum_{n=0}^{m-1} \alpha^n T_\alpha g(X_n) - \alpha^m g(X_m) \right] I(\tau > m) \right\} = 0. \quad (6)$$

Задача полягає у знаходженні оптимального моменту зупинки  $\tau^*$ , що задовольняє критерію оптимальності

$$M_x \left[ \alpha^{\tau^*} g(X_{\tau^*}) - \sum_{n=0}^{\tau^*-1} \alpha^n c(X_n) \right] = \sup_{\tau} M_x \left[ \alpha^\tau g(X_\tau) - \sum_{n=0}^{\tau-1} \alpha^n c(X_n) \right], \quad (7)$$

де супремум береться по всіх моментах зупинки, що належать класу  $\mathbf{F}$ , тоді оптимальний момент зупинки  $\tau^*$  визначається як момент першого попадання у множину

$$D = \{x : T_\alpha g(x) - c(x) \leq 0\}, \quad (8)$$

де  $T_\alpha$  — оператор очікуваного дисконтного приросту виграшу на один крок уперед, що діє на функцію виграшу  $g$  у точці  $x$ :  $T_\alpha g(x) = \alpha M_x [g(X_1)] - g(x)$ , і оптимальний момент зупинки визначається як

$$\tau^* = \inf \{n : X_n \in D\}. \quad (9)$$

Має місце основний результат:

**Теорема 2** [1]. Якщо множина  $D$  замкнена і момент зупинки  $\tau^*$  задовольняє умові (6), тоді  $\tau^*$  є оптимальним моментом зупинки.

Наведена постановка задачі аналогічна постановці задачі для монотонного випадку, що розглянута у розділі 3.5 роботи [10]. Можна порівняти теорему 2 із теоремою 3.3 у роботі [10]. Слід зауважити, що коли  $\alpha \rightarrow 1$  і  $c(x) \equiv 0$ , тоді має місце монотонний випадок, хоча у цьому випадку наведена тут умова (6) не така, як умови (3.15) і (3.17) у [10].

У модель прийняття рішень задачі оптимальної зупинки входять два рішення: рішення  $d(x) \equiv 1$  відповідає негайній зупинці у стані  $x \in D$ , а рішення  $d(x) \equiv 0$  відповідає продовженню процесу спостережень у стані  $x \in \bar{D}$ , де

$$\bar{D} = \{x : T_\alpha g(x) - c(x) > 0\}. \quad (10)$$

**Приклад 1.** Нехай  $(Y_n)$  — послідовність незалежних однаково розподілених невід'ємних випадкових величин з середнім значенням  $\mu < \infty$ . Нехай  $(Z_n)$  — послідовність незалежних однаково розподілених цілозначних

випадкових величин з середнім значенням  $\lambda < \infty$ , причому послідовності  $(Y_n)$  та  $(Z_n)$  взаємонезалежні. Для  $n = 1, 2, \dots$  покладається  $N^n = \sum_{i=1}^n Z_i$  і для  $x \geq 0$  покладається  $X_0 = x$ ,  $X_n = x + \sum_{i=1}^{N^n} Y_i$

Нехай  $f : R_+ \rightarrow R_+$  — тотожне відображення. Звідси випливає, що для  $\alpha \in (0, 1)$ ,

$$T_\alpha f(x) = \alpha \lambda \mu - (1 - \alpha)x.$$

Нехай  $c : R_+ \rightarrow R_+$  — неспадна функція. Нехай  $y$  — єдиний корінь алгебраїчного рівняння  $(1 - \alpha)x + c(x) = \alpha \lambda \mu$ , і  $\tau^* = \inf \{n : X_n \geq y\}$ . Звідси випливає, що  $\tau^*$  задовольняє умові (6) і множина  $D = [y, \infty)$  замкнена. Отже, за теоремою 2,  $\tau^*$  є оптимальним моментом зупинки.

У модель прийняття рішень для даного прикладу входять два рішення: рішення  $d(x) \equiv 1$  відповідає оптимальній зупинці у стані  $x \in D$ ; рішення  $d(x) \equiv 0$  відповідає продовженню процесу спостережень у стані  $x \in \bar{D}$ , де множина  $\bar{D} = (-\infty, y)$ .

**Приклад 2.** Нехай  $(Y_n)$  — послідовність незалежних однаково розподілених випадкових величин з функцією розподілу  $F$  із середнім значенням  $\mu < \infty$ . Для будь-якого дійсного числа  $x$ , покладається  $X_0 = x$ , і для  $n = 1, 2, \dots$ ,  $X_n = \max(x, Y_1, \dots, Y_n)$ . Нехай  $f : R \rightarrow R$  — тотожне відображення. Звідси випливає, що для  $\alpha \in (0, 1)$

$$T_\alpha f(x) = \alpha \int_x^\infty (y - x)F(dy) - (1 - \alpha)x.$$

Можна показати, що  $T_\alpha f(x)$  незростаюча функція від  $x$ . Якщо припустити, що  $c(x)$  є неспадною функцією, тоді  $x \rightarrow T_\alpha f(x) - c(x)$  є незростаючою функцією. Нехай  $y$  буде єдиним коренем інтегрального рівняння

$$\alpha \int_x^\infty (y - x)F(dy) = (1 - \alpha)x + c(x).$$

Тому  $\tau^*$  задовольняє умові (6) і множина  $D = [y, \infty)$  замкнена у розумінні, визначеному вище. Отже, за теоремою 2,  $\tau^*$  — оптимальний момент зупинки.

У модель прийняття рішень для даного прикладу входять два рішення: рішення  $d(x) \equiv 1$ , яке відповідає негайній зупинці у стані  $x \in D$  та рішення  $d(x) \equiv 0$ , що відповідає продовженню процесу спостережень у стані  $x \in \bar{D}$ , де множина  $\bar{D} = (-\infty, y)$ .

## РЕДУКОВАНА МОДЕЛЬ РІШЕНЬ У ЗАДАЧІ ОПТИМАЛЬНОЇ ЗУПИНКИ МАРКОВСЬКОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ З ВИПАДКОВОЮ ПЕРЕОЦІНКОЮ

Нехай  $X = \{X_n, F_n, P_x, n \geq 0\}$  — однорідна марковська послідовність у вимірному просторі  $(\mathbf{X}, \mathbf{V})$ , де  $g(x)$  — невід’ємна  $\mathbf{V}$ -вимірна функція.

Поряд з послідовністю  $X = \{X_n, F_n, P_x, n \geq 0\}$  задано послідовність  $\beta = \{\beta_1, \beta_2, \dots\}$  незалежних однаково розподілених випадкових величин ( $0 < \beta_n < 1, M\beta_n = b$ ), причому  $\{\beta_n, n \geq 0\}$  та  $\{X_n, n \geq 0\}$  є незалежними. Позначимо  $\beta^n = \beta_1 \beta_2 \dots \beta_n$ . Зупиняючи послідовність  $\{X_n, n \geq 0\}$  в момент  $n$ , отримуємо випадковий виграш

$$\beta^n g(X_n) - \sum_{s=0}^{n-1} \beta^{s-1} c(X_{s-1}). \quad (11)$$

Тут  $g(X_n)$  — функція виграшу в момент зупинки,  $c(X_s)$  можна трактувати як плату за можливість провести чергове спостереження, перебуваючи у стані  $X_s$  і  $\beta$  — як випадковий параметр, яким враховується зміна «цінностей» у часі. Необхідно визначити модель прийняття рішень щодо моменту зупинки, на якому досягається максимально очікуваний виграш.

Ця задача зводиться до задачі про оптимальну зупинку двовимірної марковської послідовності  $Y_n = \{\beta^n, X_n, n \geq 0\}$  у фазовому просторі  $\mathbf{Y} = (0, 1) \times \mathbf{X}$  із функцією виграшу  $f(y)$ ,  $y = (\theta, x)$ ,  $\theta \in (0, 1)$ ,  $x \in \mathbf{X}$ , причому

$$f(y) = f(\theta, x) = \theta g(x), \quad \theta \in (0, 1), \quad x \in \mathbf{X}. \quad (12)$$

Таким чином,  $\{Y_n, n \geq 0\}$  — однорідна у часі марковська послідовність з перехідними ймовірностями

$$P\{Y_{n+1} \in B \mid Y_n = y\} = P[\beta \leq \theta' / \theta] P(x, B'), \quad (13)$$

де  $B = (0, \theta') \times B'$ ,  $0 < \theta' < \theta$ ,  $P(x, B') = P\{X_{n+1} \in B' \mid X_n = x\}$ .

Отже, у вимірному просторі  $(\mathbf{Y}, \tilde{\mathbf{B}})$  задано марковську послідовність  $Y = \{Y_n, n \geq 0\}$  з перехідним оператором  $T_Y f(y) = M_y f(Y_1) = \int_{\mathbf{Y}} P(y, dz) f(z)$ . Нехай  $\varphi(\theta, x) = x$  — вимірне відображення  $(0, 1) \times \mathbf{X} \rightarrow \mathbf{X}$ ;  $h(y) = h(\theta, x) = \theta$  —  $\tilde{\mathbf{B}}$ -вимірна функція в  $\mathbf{Y}$ ;  $g(\varphi(y)) = g(\varphi(\theta, x)) = g(x) \geq 0$  —  $\mathbf{B}$ -вимірна функція в  $\mathbf{X}$ . Тоді, зупиняючи послідовність  $\{Y_n\}$  у точці  $(\theta, x) \in (0, 1) \times \mathbf{X}$ , отримаємо виграш

$$f(\theta, x) = h(\theta, x) g[\varphi(\theta, x)], \quad (14)$$

причому для будь-якої вимірної функції  $f \in L(\mathbf{X}, \mathbf{B})$  справедливе співвідношення [8]:

$$T_Y [f(\varphi)h] = h b T_X g(\varphi), \quad (15)$$

де  $T_X$  — перехідний оператор послідовності  $\{X_n\}$ , а  $bT_X$  — добуток  $T_X$  і оператора множення на сталу  $b$ , причому  $bT_X$  — оператор, що зберігає нерівності у просторі  $(\mathbf{X}, \mathbf{B})$ .

За аналогією [8, 13] мають місце наступні результати:

**Лема 1.** Найменша  $T_Y$ -експесивна мажоранта функції  $f(\theta, x)$  є функція  $s(\theta, x)$ , що задовольняє рівняння Вальда

$$s(\theta, x) = \max \{f(\theta, x), T_Y s(\theta, x)\}, \quad (16)$$

яке, взагалі-то, немає єдиного розв'язку у просторі  $\tilde{\mathbf{B}}$ -вимірних функцій.

**Лема 2.** Найменша  $T_Y$ -ексцесивна мажоранта функції  $f(\theta, x)$  є функція

$$s(\theta, x) = \theta \sigma_b(x), \quad \theta \in (0, 1), \quad x \in \mathbf{X}, \quad (17)$$

де функція  $\sigma_b(x)$  є найменшою  $bT_X$ -ексцесивною мажорантою функції  $g(x)$ .

**Лема 3.** Якщо функція  $\sigma_b(x)$  — найменша  $bT_X$ -ексцесивна мажоранта функції  $g(x)$ , то вона задовольняє рівняння Вальда

$$\sigma_b(x) = \max\{g(x), bT_X \sigma_b(x)\}, \quad (18)$$

що має єдиний розв'язок у просторі  $\mathbf{B}$ -вимірних функцій.

**Наслідок.** Функція  $\sigma_b(x)$  є достатньою статистикою у задачі оптимальної зупинки, а очікуваний фактор переоцінки впливає лише на область оптимальної зупинки.

Це твердження впливає із лем 2, 3. Справді, порівнюючи вирази (17) та (18), доходимо висновку про те, що у задачі про оптимальну зупинку з випадковою переоцінкою достатньо спостерігати лише еволюцію одновимірної послідовності  $\{X_n, n \geq 0\}$ .

Зокрема, оптимальний момент зупинки  $\tau^*$  визначається як момент першого попадання у множину

$$B = \{x : \sigma_b(x) = g(x), \quad bT_X g(x) - c(x) \leq 0\}, \quad (19)$$

де  $bT_X$  — оператор, що діє на функцію виграшу  $g$  у стані  $x$ , визначає очікуваний дисконтний приріст виграшу від зупинки на наступному періоді часу, тобто  $bT_X g(x) = bM_x[g(X_1)] - g(x)$ , і оптимальний момент зупинки визначається як

$$\tau^* = \inf\{n : X_n \in B\}. \quad (20)$$

Має місце наступний основний результат:

**Теорема 3.** Якщо виконуються вище наведені умови (14–15) і множина  $B$  замкнена, тоді  $\tau^*$  є оптимальним моментом зупинки.

У модель прийняття рішень у даній задачі оптимальної зупинки входять два рішення: рішення  $d(x) \equiv 1$  відповідає негайній зупинці у стані  $x \in B$ ; рішення  $d(x) \equiv 0$  відповідає продовженню на один період часу процесу спостережень у стані  $x \in \bar{B}$ , де

$$\bar{B} = \{x : \sigma_b(x) = g(x), \quad bT_X g(x) - c(x) > 0\}. \quad (21)$$

## ПОСЛІДОВНІ ПРАВИЛА ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В ЗАДАЧІ ПЕРЕВІРКИ ДВОХ ПРОСТИХ СТАТИСТИЧНИХ ГІПОТЕЗ

Нехай  $Y_1, Y_2, \dots$  — незалежні однаково розподілені випадкові величини із щільністю розподілу  $f$  відносно деякої  $\sigma$ -скінченної міри  $\mu$  на прямій.

Необхідно перевірити гіпотезу  $H_0 : f = f_0$  щодо гіпотези  $H_1 : f = f_1$ , де  $f_0$  і  $f_1$  — задані функції. Втрати, пов'язані з прийняттям гіпотези  $H_1$  у випадку, коли справедлива гіпотеза  $H_0$ , дорівнюють  $a > 0$ ; втрати через прийняття  $H_0$  у випадку, коли справедлива  $H_1$ , дорівнюють  $b > 0$ ; вартість проведення кожного спостереження  $y_i$  дорівнює одиниці. Процедура послідовних рішень  $(\delta, N)$  складається з моменту  $N$  зупинки спостережень та прийняття остаточного рішення  $\delta$ . Математичне сподівання втрат для рішення  $(\delta, N)$  дорівнює

$$\begin{aligned} & \alpha_0 a + M_0(N), \text{ якщо справедлива гіпотеза } H_0, \\ & \alpha_1 b + M_1(N), \text{ якщо справедлива гіпотеза } H_1, \end{aligned} \quad (22)$$

де  $\alpha_0 = P_0$  (прийнято  $H_1$ ),  $\alpha_1 = P_1$  (прийнято  $H_0$ ).

Якщо існує апіорна ймовірність  $\pi$  того, що має місце гіпотеза  $H_0$  і, отже, ймовірність  $1 - \pi$  того, що має місце гіпотеза  $H_1$ , то очікуваний ризик для рішення  $(\delta, N)$  задається формулою

$$r(\pi, \delta, N) = \pi[\alpha_0 a + M_0(N)] + (1 - \pi)[\alpha_1 b + M_1(N)]. \quad (23)$$

Для даного моменту зупинки  $N$  легко визначити правило остаточного рішення  $\delta$ , яке мінімізує ризик  $r(\pi, \delta, N)$  при фіксованих значеннях  $a, b, \pi$ . Для цього оцінюється вклад рішення  $\delta$  у ризик  $r(\pi, \delta, N)$ , що дорівнює [12]:

$$\begin{aligned} & \pi \alpha_0 a + (1 - \pi) \alpha_1 b + \pi a \sum_{n=1}^{\infty} \int_{\{N=n, \text{ прийнято } H_1\}} f_0(y_1) \dots f_0(y_n) d\mu(y_1) \dots d\mu(y_n) + \\ & + (1 - \pi) b \sum_{n=1}^{\infty} \int_{\{N=n, \text{ прийнято } H_0\}} f_1(y_1) \dots f_1(y_n) d\mu(y_1) \dots d\mu(y_n) \geq \\ & \geq \sum_{n=1}^{\infty} \int_{\{N=n\}} \min[\pi a f_0(y_1) \dots f_0(y_n), (1 - \pi) b f_1(y_1) \dots f_1(y_n)] d\mu(y_1) \dots d\mu(y_n) = \\ & = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{\{N=n\}} \min[\pi_n a, (1 - \pi_n) b] [\pi f_0(y_1) \dots f_0(y_n) + \\ & + (1 - \pi) f_1(y_1) \dots f_1(y_n)] d\mu(y_1) \dots d\mu(y_n), \end{aligned}$$

де

$$\pi_n = \pi_n(y_1, \dots, y_n) = \frac{\pi f_0(y_1) \dots f_0(y_n)}{\pi f_0(y_1) \dots f_0(y_n) + (1 - \pi) f_1(y_1) \dots f_1(y_n)}. \quad (24)$$

Для даного моменту зупинки  $N$  визначається правило прийняття рішень  $\delta'$  таким чином:

$$\begin{aligned} & \text{приймається } H_1, \text{ якщо } N = n \text{ та } \pi_n a \leq (1 - \pi_n) b, \\ & \text{приймається } H_0, \text{ якщо } N = n \text{ та } \pi_n a > (1 - \pi_n) b \end{aligned}$$

Тоді

$$\pi a \alpha_0(\delta, N) + (1 - \pi) b \alpha_1(\delta, N) \geq \pi a \alpha_0(\delta', N) + (1 - \pi) b \alpha_1(\delta', N). \quad (25)$$

Отже, відшукування пари  $(\delta', N)$ , яка для даного апіорного розподілу  $\pi$  мінімізує ризик  $r(\pi, \delta, N)$ , представляє байєсову процедуру перевірки простих статистичних гіпотез  $H_0, H_1$ .

## ЛІТЕРАТУРА

1. *Abdel-Hameed M.* Identities for Stopped Markov Chains and their Applications // Applied Stochastic Models and Data Analysis. — 1986. — 2, № 4. — P. 193–208.
2. *Arrow K.J., Blackwell D., Girshick M.A.* Bayes and minimax solutions of sequential decision problems // Econometrica. — 1947. — 17. — P. 213–214.
3. *Hochman E.* An Optimal Stopping Problem of a Growing Inventory // Management Science. — 1973. — 19, № 11. — P. 1289–1291.
4. *Elfving G.* A Persistency Problem Connected with a Point Process // Journal of Applied Probability — 1967. — 4. — P. 77–89.
5. *Snell J.L.* Applications of martingale system theorem and applications // Transactions of the American Mathematical Society. — 1953. — P. 73–101.
6. *Вальд А.* Последовательный анализ. — М.: Физматгиз, 1960. — 325 с.
7. *Де Гроот М.* Оптимальные статистические решения. — М.: Мир, 1974. — 492 с.
8. *Дынкин Е.Б.* Достаточные статистики для задачи об оптимальной остановке // Теория вероятностей и ее применение — 1968. — XIII. — № 1. — С. 150–151.
9. *Неве Ж.* Математические основы теории вероятностей. — М.: Мир, 1969. — 307 с.
10. *Роббинс Г., Сигмунд Д., Чао И.* Теория оптимальных правил остановки. — М.: Наука, 1977. — 167 с.
11. *Ширяев А.Н.* Статистический последовательный анализ. Оптимальные правила остановки. — М.: Наука, 1976. — 272 с.
12. *Чао И.С., Роббинс Г.* Об оптимальных правилах остановки // Математика (сб. переводов). — 1965. — 9, № 3. — С. 444–454.
13. *Андреев Н.В., Губенко Л.Г., Штатланд Э.С.* Об одной задаче оптимальной остановки марковских последовательностей со случайной переоценкой // Сб. ст. «Теория оптимальных решений». — Киев: ИК АН УССР. — 1968. — № 5. — С. 100–104.
14. *Андреев Н.В.* Оптимальная остановка процесса марковского восстановления с малой вероятностью поглощения // Кибернетика и системный анализ. — 1994. — № 6. — С. 176–179.
15. *Андреев Н.В.* Оптимальная остановка агрегированных и слабо возмущенных дезагрегированных марковских и полумарковских моделей в дискретном времени // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2002. — № 3. — С. 139–146.
16. *Андреев М.В.* Синтез оптимальних стратегій планування стохастичного експерименту в задачах найшвидшого виявлення неполадки // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2003. — № 3. — С. 111–119.

Надійшла 09.12.2009

## ОПТИМАЛЬНИЙ РОЗПОДІЛ ГІДРОРЕСУРСІВ У ЗРОШУВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ МЕРЕЖЕВОЇ СТРУКТУРИ

О.Є. КІРІК, В.В. ОСТАПЕНКО

Створено математичну модель транспортування та розподілу ресурсів із узагальненим законом збереження. Для цієї оптимізаційної задачі утримання потоків у певних межах побудовано алгоритми, що базуються на ефективних методах нелінійного програмування. Запропоновано підхід, який дає можливість розв'язувати задачі розподілу потоків із різнотипними нелінійними цільовими функціями для мереж з довільною кількістю замкнених циклів.

Реалізація програм меліорації передбачає вирішення низки складних питань, передусім екологічних. Меліоративне будівництво вносить зміни в екологічний баланс великих природних водних систем. Наслідки таких змін для навколишнього середовища ще недостатньо добре прогнозуються, а тому домогтися найближчим часом радикальних позитивних змін водного балансу в сільському господарстві не вдається. Отже, найважливішим завданням у найближчі роки є економія води в цій галузі, її раціональне використання. В зрошувальному секторі не тільки найбільша потреба у воді, але й значні можливості для її економії — при умові введення ефективних систем управління.

У роботі розглядається задача розподілу гідроресурсів у зрошувальних системах мережевої конфігурації, які топологічно можуть бути представлені як графи із циклами. Питання задоволення всіх користувачів за умови обмеженої пропускної здатності каналів зрошувальної системи та необхідності утримання потоків зрошувальної води в певних межах призводить до побудови математичної моделі розподілу потоків з узагальненим законом збереження, що описується за допомогою системи лінійних нерівностей, структура яких задається відповідним графом.

Математична формалізація розподілу потоків із узагальненим принципом збереження виникла саме при розв'язанні задач керування рухом води в каналах зрошувальних систем. Вперше її було розглянуто в роботах [1–3], де запропоновано використовувати метод виключення невідомих із систем лінійних нерівностей. Загалом, задачі розподілу потоків із узагальненим принципом збереження найбільш повно досліджені у монографії [4].

У роботі задачу розподілу гідроресурсів представлено у вигляді екстремальної задачі на графі. Економне споживання води розглянуто в контексті доставки її споживачам найкоротшим шляхом з найменшими витратами. Вибір квадратичної цільової функції зумовлений тим, що на відміну від лінійної, вона гарантує протікання води вздовж усіх каналів зрошувальної системи, крім того дозволяє використовувати для розв'язання цієї задачі добре розроблений апарат квадратичного програмування.

**Мета роботи** — побудова нових моделей руху потоків у мережах та розробка алгоритмів знаходження оптимальних потоків на основі нелінійних методів оптимізації.

Нові моделі та методи орієнтовано на управління водорозподілом та раціональним використанням води при експлуатації зрошувальних систем.

### МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ ПОТОКІВ ЗА ДОПОМОГОЮ УЗАГАЛЬНЕНОГО ЗАКОНУ ЗБЕРЕЖЕННЯ

Головною системою обмежень для змінних у класичних задачах розподілу потоків у мережах є закон збереження. Згідно із цим законом необхідно, щоб у кожній вершині виконувалася умова матеріального балансу, тобто різниця кількості речовини, що втікає й витікає з вершини має дорівнювати споживанню у ній. Розглянемо моделі процесів, в яких ця різниця може належати деякому проміжку.

У задачі керування рухом води у каналах зрошувальної системи об'єктами керування є споруди, що перетинають та поділяють канали на окремі ділянки або б'єфи, насосні станції, які подають воду у канал та водо-забірні споруди. Основне завдання полягає у виконанні замовлень споживачів при раціональному використанні води. Для розв'язання цього завдання необхідно утримувати рівень води у каналах у заданих межах. Будемо вважати, що основні споживачі розташовано в кінці ділянок, де також розміщено й вимірювальні прилади. Тому вивчатимемо задачу утримання рівнів води у вузлових точках системи, що сполучають б'єфи. Оскільки зрошувальні системи мають складну топологічну структуру і містять у собі велику кількість об'єктів, то для аналізу процесів, які відбуваються у цих системах, необхідно створювати прості, але ефективно працюючі моделі руху води у кожному б'єфі.

Розглянемо рух води в одному б'єфі. Введемо позначення:  $h(x, t)$  — рівень води в точці  $x$  у момент  $t$ ;  $l$  — довжина б'єфу;  $x = 0$  ( $x = l$ ) — координата верхнього (нижнього) кінця б'єфу;  $Q(t)$  ( $-q(t)$ ) — витрати води, яка тече через верхню (нижню) гідротехнічну споруду.

Припустимо, що до моменту  $t = 0$  у б'єфі був рівномірний постійний рух води з рівнем  $H$ . Нехай у точках  $x = 0$  та  $x = l$  розташовано джерело та стік води, які змінюють рівень води у цих точках (інші джерела не враховуються), відповідно до функцій  $h^0(t) + H$  та  $h^l(t) + H$ .

Витрати води — це кількість води, що протікає в одиницю часу через будь-який переріз.

Рух води в каналі без урахування споруд, що перегороджують, описується рівняннями Сен-Венана [5]. Ці рівняння є квазілінійними і загалом не мають аналітичного розв'язку. Але, якщо довести, що хвилі, які передають витрати води ( $Q(t)$  та  $q(t)$ ) відносно малі, то застосовуючи теорію хвиль малої амплітуди [5], можна отримати розв'язок в аналітичному вигляді. Цей розв'язок дає значення швидкостей руху води вниз та вгору за течією. Позначимо ці швидкості відповідно  $\omega_+$  та  $\omega_-$ . Тоді  $\tau_0 = l/\omega_+$  — час проходження хвиль від верхнього до нижнього кінця б'єфу. Якщо знехтувати відбиттям хвиль біля споруд, що перегороджують, то рівень води у точці  $x = l$  буде визначатися за формулою

$$h(l, t) = ch^0(t - \tau_0) + h^l(t) + H, \quad (1)$$



де  $t \geq 0$ ,  $0 \leq \alpha \leq 1$  — коефіцієнт згасання хвилі, яка пройшла шлях від  $x = 0$  до  $x = l$ . Уточнюючи початкові умови, задамо

$$Q(t) = 0, \quad t \leq -\tau_0, \quad q(t) = 0, \quad t \leq 0. \quad (2)$$

У цьому випадку  $h(l, 0) = H$ .

Будемо вважати, що споживачі розташовані у точці  $x = l$ . Випадок зі споживачами, які розосереджені по всьому б'єфу, розглянутий у роботі [6], і зводиться до випадку зі споживачами, які зосереджені у кінці б'єфу.

Будемо керувати рухом води, враховуючи її витрати, тоді головні обмеження будуть накладатися на рівні води. Тому опишемо модель, яка пов'язує витрати води і значення рівня води.

$$\text{Припустимо, що } \frac{d}{dt} h^0(t) = c^1 Q(t) - k^1 h^0(t), \quad \frac{d}{dt} h^1(t) = -c^2 q(t) - k^2 h^1(t),$$

де  $c^i$ ,  $k^i$ ,  $i = 1, 2$  — додатні сталі. Умови (2) гарантують виконання умов  $h^0(0) = 0$ ,  $h^1(\tau_0) = 0$ . Звідси випливає, що

$$h^0(t - \tau_0) = \int_0^t e^{-k^1(t-\tau)} c^1 Q(\tau - \tau_0) d\tau, \quad (3)$$

$$h^1(t - \tau_0) = -\int_0^t e^{-k^2(t-\tau)} c^2 q(\tau) d\tau. \quad (4)$$

Надалі необхідно визначити відношення  $k^i / c^i$ . Зробимо це за допомогою наступних міркувань. Витрати води, що втікає у б'єф, мають дорівнювати витратам води, що переноситься сформованою хвилею:

$$Q(t) = \omega_+ h^0(t) b, \quad (5)$$

де  $b$  — ширина каналу. Оскільки рівність (5) має виконуватися за умови  $Q(t) = \text{const}$ , то

$$\omega_+ b c^1 \int_0^t e^{-k^1(t-\tau)} d\tau = 1 \quad \text{або} \quad \frac{k^1}{c^1} = \omega_+ b \left( 1 + e^{-k^1 t} \right).$$

Звідси для великих  $t$  отримуємо  $k^1 / c^1 \approx \omega_+ b$ . Аналогічно  $k^2 / c^2 \approx \omega_- b$ .

Як правило, швидкість течії води відносно мала у порівнянні зі швидкістю переміщення хвиль. Тому спростимо модель, припускаючи, що  $\omega_+ = \omega_-$ . У цьому випадку також цілком природно припустити, що  $c^1 = c^2 = c$ ,  $k^1 = k^2 = k$ . Звідси з формул (3), (4) отримуємо

$$h(l, t) = H + \int_0^t e^{-k(t-\tau)} c [Q(\tau - \tau_0) - q(\tau)] d\tau. \quad (6)$$

Розглянемо питання сполучення декількох б'єфів. Для початку візьмемо ланцюг, що складається з двох б'єфів. Нехай  $Q_1$  — витрати води, яка подається у перший б'єф;  $Q_2$  — витрати води, що перетікає із першого б'єфа у

другий;  $q_i$  — величина споживання у  $i$ -му б'єфі. Нехай  $h_i(l_i, t)$  — рівень води у кінці  $i$ -го б'єфу;  $H_i$  — рівень до початку керування;  $c_i$  та  $k_i$  — коефіцієнти, які зв'язують рівень і витрату води у  $i$ -му б'єфі;  $\tau_i$  — час проходження хвилию  $i$ -го б'єфа;  $\alpha_i$  — коефіцієнт згасання для  $i$ -го б'єфа.

З формули (6) випливає

$$h_1(l_1, t) = H_1 + \int_0^t e^{-k_1(t-\tau)} c_1 [\alpha_1 Q_1(\tau - \tau_1) - Q_2(\tau) - q_1(\tau)] d\tau,$$

$$h_2(l_2, t) = H_2 + \int_0^t e^{-k_2(t-\tau)} c_2 [\alpha_2 Q_2(\tau - \tau_2) - q_2(\tau)] d\tau.$$

Припустимо, що до першого б'єфу є суміжними не один, а два нижніх б'єфи, які позначимо номерами  $i = 2, 3$ . Вважаємо, що у кінці першого б'єфу розташовано дві споруди, що перегороджують, одна з яких пропускає витрати води  $Q_2$  у другий б'єф, витрати  $Q_3$  у третій б'єф. У цьому випадку з формули (6) випливає

$$h_1(l_1, t) = H_1 + \int_0^t e^{-k_1(t-\tau)} c_1 [\alpha_1 Q_1(\tau - \tau_1) - Q_2(\tau) - Q_3(\tau) - q_1(\tau)] d\tau,$$

$$h_i(l_i, t) = H_i + \int_0^t e^{-k_i(t-\tau)} c_i [\alpha_i Q_i(\tau - \tau_i) - q_i(\tau)] d\tau \quad (i = 2, 3).$$

Розглянемо випадок сполучення двох б'єфів. Витрати  $Q_i$ ,  $i = 1, 2$ , які надходять до б'єфу, що їх сполучає, регулюються кожні своєю перегородкою, яка знаходиться вгорі б'єфу. Нижні кінці обох б'єфів збігаються, і в цьому місці розташовано споживача із витратами (стоком)  $q$ . Нехай  $\bar{h}(t)$  — рівень води у точці сполучення цих об'єктів,  $H$  — початковий рівень. У цьому випадку формула (6) змінюється таким чином:

$$\bar{h}(t) = H + \int_0^t e^{-k(t-\tau)} c [\alpha_1 Q_1(\tau - \tau_1) + \alpha_2 Q_2(\tau - \tau_2) - q(\tau)] d\tau. \quad (7)$$

За допомогою формул (6)–(7) опишемо рух води у зрошувальній системі, структура якої задається направленим графом  $G = (N, V)$ . Тут  $N$  — множина вершин,  $V$  — множина дуг. Споруди, що перегороджують та насосні станції, які подають воду до системи, інтерпретуватимемо як вершини графа, а б'єфи — як дуги графа. Дуги направлено від верхнього кінця б'єфу до нижнього.

Кожній вершині  $i \in N$  припишемо коефіцієнти  $c_i$  та  $k_i$ , які описують зв'язок між витратами води та рівнями. Нехай  $h_i(t)$  — поточний;  $H_i$  — початковий рівні перед  $i$ -ою перегородкою;  $q_i$  — витрати споживача, який розташовано перед  $i$ -ою перегородкою. Будемо вважати, що вздовж дуг  $(j, i)$  проходять потоки  $Q_{ji}$ . Нехай  $\alpha_{ji}$  — коефіцієнт згасання хвилі при проходженні дуги  $(j, i)$ , а  $\tau_{ji}$  — час проходження дуги  $(j, i)$ .

Для кожної вершини  $i \in N$  визначимо множини  $N^+(i) = \{i \in N : (i, j) \in V\}$ ,  $N^-(i) = \{i \in N : (j, i) \in V\}$ .

Множина  $N^+(i)$  описує всі початкові вершини дуг, які виходять із вершини  $i$ ; множина  $N^-(i)$  описує всі вершини дуг, які входять у вершину  $i$ . Узагальнимо формули (6)–(7):

$$h_i(t) = H_i + \int_0^t e^{-k_i(t-\tau)} c_i \left[ \sum_{j \in N^-(i)} \alpha_{ji} Q_{ji}(\tau - \tau_{ji}) - \sum_{k \in N^+(i)} Q_{ik}(\tau) - q_i(\tau) \right] d\tau, \quad i \in V. \quad (8)$$

Зазначимо, що крім (8), величини  $Q_{ji}$  мають задовольняти обмеженням вигляду

$$0 \leq Q_{ji} \leq Q_{ji}^{\max}, \quad (9)$$

де  $Q_{ji}^{\max}$  — деякі сталі.

Розглянемо питання утримання рівнів  $h_i(t)$  у заданих межах

$$H_i^- \leq h_i(t) \leq H_i^+, \quad i \in V, \quad (10)$$

де  $H_i^-$ ,  $H_i^+$  — деякі сталі.

Сформулюємо задачу. На заданому проміжку часу  $[0, T]$  необхідно вибрати величини потоків  $Q_{ji}(t)$ , які задовольнятимуть обмеженням (9) так, щоб на цьому проміжку виконувались нерівності (10).

Припустимо, що  $H_i \in [H_i^-, H_i^+]$ . Тоді з [4] випливає, що умови (10) виконуються, якщо для будь-якого  $t \in [0, T]$  виконуються нерівності

$$\begin{aligned} H_i^- - H_i &\leq c_i \int_0^T e^{-k_i(T-\tau)} d\tau \left[ \sum_{j \in N^-(i)} \alpha_{ji} Q_{ji}(t - \tau_{ji}) - \sum_{k \in N^+(i)} Q_{ik}(t) - q_i(t) \right] \leq \\ &\leq H_i^+ - H_i, \quad i \in V. \end{aligned} \quad (11)$$

Система нерівностей (11) залежить від  $T$ . Оскільки  $k_i > 0$ , то безпосередньою перевіркою можна показати, що (11) випливає із системи

$$\begin{aligned} \frac{k_i}{c_i} [H_i^- - H_i] &\leq \sum_{j \in N^-(i)} \alpha_{ji} Q_{ji}(t - \tau_{ji}) - \\ - \sum_{k \in N^+(i)} Q_{ik}(t) - q_i(t) &\leq \frac{k_i}{c_i} [H_i^+ - H_i], \quad i \in V. \end{aligned} \quad (12)$$

Система нерівностей (12) становить узагальнений закон збереження. Розв'язуючи (12) разом із обмеженнями (9), одержуємо розв'язок задачі утримання (10).

Узагальнимо задачу (12), (9). Розглянемо потоки, які описуються системою лінійних нерівностей:

$$\sum_{j \in N^-(i)} \alpha_{ji} x_{ji}(t - \tau_{ji}) - \sum_{k \in N^+(i)} \beta_{ik} x_{ik}(t) \in A_i, \quad i \in V, \quad (13)$$

$$x_{ji}(t) \in B_{ji}(t), \quad (j, i) \in E, \quad t \in [0, \infty]. \quad (14)$$

Тут  $A_i(t)$ ,  $B_{ji}(t)$  — задані проміжки, залежні від часу;  $\alpha_{ji} > 0$  і  $\beta_{ik} > 0$  — сталі;  $\tau_{ji}$  — час, за який течія  $x_{ji}(t)$  проходить дугою  $(j, i)$ . Перехід від системи (12), (9) до системи (13), (14) здійснюється за формулами

$$x_{ji}(t) = Q_{ji}(t), \quad \beta_{ik} = 1, \quad B_{ji}(t) = [0, Q_{ji}^{\max}],$$

$$A_i(t) = \left[ \frac{k_i}{c_i} (H_i^- - H_i), \frac{k_i}{c_i} (H_i^+ - H_i) \right] + q_i(t).$$

Якщо не враховувати час добігання хвилі, тобто надати значення  $\tau_{ji} = 0$ , то у кожний момент  $t$  формули (13) та (14) будуть утворювати систему лінійних нерівностей. Якщо систему (13), (14) розглядати за  $t \in (0, \infty)$  і при цьому  $A_i(t) \equiv \text{const}$  та  $B_{ij}(t) \equiv \text{const}$  для всіх  $i \in N$ ,  $(i, j) \in V$ , то можна обрати  $x_{ij}(t) \equiv \text{const}$  і система (13), (14) знову стає системою лінійних нерівностей. Фізично цей випадок означає пошук течій при постійному режимі.

Отже, задача моделювання руху води за допомогою узагальненого закону збереження без урахування часу добігання зводиться до розв'язання систем лінійних алгебраїчних нерівностей із спеціальною структурою, що визначається за допомогою відповідних графів.

### ОПТИМІЗАЦІЙНА ЗАДАЧА РОЗПОДІЛУ ПОТОКІВ ІЗ УТРИМАННЯМ РІВНІВ ВОДИ У ЗАДАНИХ МЕЖАХ

Нехай водорозподільчу мережу представлено у вигляді скінченного зв'язного плоского орієнтовного графа  $G(N, V)$ , де  $N$  та  $V$  відповідно множини його вершин і дуг, причому кожній дузі  $(i, j) \in V$  поставлено у відповідність вершини  $i, j \in N$ , що є її початком та кінцем. Знаючи потреби споживачів у воді у вершинах графа, необхідно розподілити потоки води таким чином, аби доставити воду споживачам оптимальним шляхом.

Сформулюємо оптимізаційну задачу так:

$$F = \frac{1}{2} \sum_{(i,j) \in V} l_{ij} x_{ij}^2 \rightarrow \min, \quad (15)$$

$$d_i^- \leq \sum_{j \in N^+(i)} \alpha_{ij} x_{ij} - \sum_{j \in N^-(i)} \alpha_{ji} x_{ji} \leq d_i^+, \quad i \in N, \quad (16)$$

$$r_{ij}^- \leq x_{ij} \leq r_{ij}^+, \quad (i, j) \in V. \quad (17)$$

Якщо дуга  $(i, j) \in V$  відображає певну ділянку (б'єф) водорозподільчої мережі довжиною  $l_{ij}$ , то  $x_{ij} = -x_{ji}$  — величина потоку вздовж цієї дуги, а  $\alpha_{ij} > 0$  — коефіцієнт, що характеризує втрати води при її проходженні вздовж цієї ділянки.

Узагальнений закон збереження (16) відображає той факт, що витрати води у кожній вершині (різниця потоків, які витікають із вершини та втікають у неї) залишаються у певних межах, що гарантують задоволення споживачів. Величина потоків обмежується пропускною здатністю мережі (17).

Цільова функція (15) задачі є сепарабельною і, з огляду на фізичний зміст коефіцієнтів  $l_{ij}$ ,  $(i, j) \in V$ , додатньовизначеною. Таким чином, задача (15)–(17) — це задача квадратичного програмування і її розв'язок, за умови сумісності обмежень, завжди існує [7]. Виведемо необхідні умови екстремуму для цієї задачі.

Представимо обмеження (16) у вигляді системи односторонніх нерівностей

$$\sum_{j \in N^+(i)} \alpha_{ij} x_{ij} - \sum_{j \in N^-(i)} \alpha_{ji} x_{ji} \leq d_i^+, \quad (18)$$

$$- \sum_{j \in N^+(i)} \alpha_{ij} x_{ij} + \sum_{j \in N^-(i)} \alpha_{ji} x_{ji} \leq -d_i^-, \quad (19)$$

і побудуємо для задачі (15), (17), (18), (19) функцію Лагранжа:

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{2} \sum_{(i,j) \in V} l_{ij} x_{ij}^2 + \sum_{i \in N} \left[ (p_i^+ - p_i^-) \sum_{j \in N^+(i)} \alpha_{ij} x_{ij} - (p_i^+ - p_i^-) \sum_{j \in N^-(i)} \alpha_{ji} x_{ji} \right] - \\ &\quad - \sum_{i \in N} (p_i^+ d_i^+ - p_i^- d_i^-) = \\ &= \sum_{(i,j) \in V} \left\{ \frac{1}{2} l_{ij} x_{ij}^2 + x_{ij} [(p_i^+ - p_i^-) \alpha_{ij} - (p_j^+ - p_j^-) \alpha_{ji}] \right\} - \sum_{i \in N} (p_i^+ d_i^+ - p_i^- d_i^-). \quad (20) \end{aligned}$$

Тут  $p_i^+, p_i^-$   $i \in N$  — множники Лагранжа, що відповідають обмеженням (18), (19).

Якщо точка  $\{\tilde{x}_{ij}, \tilde{p}_i^+, \tilde{p}_i^-\}$ , де  $r_{ij}^- \leq \tilde{x}_{ij} \leq r_{ij}^+$ ,  $(i, j) \in V$ ,  $\tilde{p}_i^+ \geq 0$ ,  $\tilde{p}_i^- \geq 0$ ,  $i \in N$  є сідловою точкою функції Лагранжа (20), то  $\tilde{x}_{ij}$  є розв'язком вихідної задачі [7].

Перш ніж перейти до побудови двоїстої задачі, розглянемо властивості функції  $h(x, u) = \frac{1}{2} l x^2 + u x$ , де  $l > 0$ . Функція  $h(x, u)$  є опуклою при довільному  $u$ , а її похідна  $h_x(x, u) = l x + u$  є монотонно зростаючою функцією.

Розв'язок одновимірної задачі квадратичного програмування

$$\min_{r^- \leq x \leq r^+} h(x, u) \tag{21}$$

завжди існує.

Оскільки похідна цільової функції цієї задачі — монотонно зростаюча функція, то при  $lr^- + u \geq 0$  мінімальне значення досягається на нижній границі допустимого інтервалу  $x(u) = r^-$ . Якщо  $lr^+ + u \leq 0$ , то з огляду на від’ємність похідної, функція  $h$  спадає і її мінімальне значення досягається на верхній межі інтервалу  $x(u) = r^+$ . При  $lr^- + u < 0$ ,  $lr^+ + u > 0$  існує єдиний корінь всередині інтервалу  $x \in (r^-, r^+)$ , який знаходиться з умови  $lx + u = 0$ .

Таким чином, точка мінімуму задачі (21) або приймає постійні значення, що співпадають із  $r^-$  чи  $r^+$ , або всередині інтервалу допустимості, залежить від  $u$ .

Позначимо  $\tilde{h}(u)$  — мінімальне значення функції  $\tilde{h}(x, u)$  для  $x \in (r^-, r^+)$ . Тоді, згідно з теоремою про похідну від функції мінімуму [7], функція  $\tilde{h}(u)$  є диференційованою по  $u$  і її похідна дорівнюватиме значенню похідної від  $h(x, u)$  по  $u$ , взятій у точці мінімуму  $x(u)$ :  $h'_u(u) = x(u)$ .

Враховуючи сказане вище, випишемо необхідні умови екстремуму для одновимірної задачі

$$\min_{r_{ij}^- \leq x_{ij} \leq r_{ij}^+} \left\{ \frac{1}{2} l_{ij} x_{ij}^2 + x_{ij} \left[ (p_i^+ - p_i^-) \alpha_{ij} - (p_j^+ - p_j^-) \alpha_{ji} \right] \right\}. \tag{22}$$

**Теорема 1.** Якщо  $x_{ij} = r_{ij}^-$ , то похідна цільової функції задачі (22) має бути невід’ємною:  $l_{ij} x_{ij} \geq (p_j^+ - p_j^-) \alpha_{ji} - (p_i^+ - p_i^-) \alpha_{ij}$ . Якщо  $x_{ij} = r_{ij}^+$ , то похідна цільової функції задачі (22) має бути недодатньою:  $l_{ij} x_{ij} \leq (p_j^+ - p_j^-) \alpha_{ji} - (p_i^+ - p_i^-) \alpha_{ij}$ . Якщо  $x_{ij}$  знаходиться всередині інтервалу, то похідна має дорівнювати нулю  $l_{ij} x_{ij} = (p_j^+ - p_j^-) \alpha_{ji} - (p_i^+ - p_i^-) \alpha_{ij}$ .

Позначимо  $p_{ij} = (p_j^+ - p_j^-) \alpha_{ji} - (p_i^+ - p_i^-) \alpha_{ij}$ . З необхідних умов екстремуму отримуємо, що мінімум  $L$  з врахуванням простих обмежень  $x_{ij} \in [r_{ij}^-, r_{ij}^+]$  досягається в точці

$$x_{ij} = \begin{cases} r_{ij}^-, & \text{якщо } p_{ij} \leq r_{ij}^- l_{ij}, \\ -\frac{p_{ij}}{l_{ij}}, & \text{якщо } r_{ij}^- l_{ij} \leq p_{ij} \leq r_{ij}^+ l_{ij}, \\ r_{ij}^+, & \text{якщо } p_{ij} \geq r_{ij}^+ l_{ij}. \end{cases} \tag{23}$$

Згідно із теорією двоїстості [7], розв’язок задачі (14), (17), (18), (19) еквівалентний максимізації вгнутої неперервно-диференційованої функції  $\Phi = \min_{r_{ij}^- \leq x_{ij} \leq r_{ij}^+} L$ .

Знаючи оптимальні значення  $\tilde{p}_i^+ \geq 0, \tilde{p}_i^- \geq 0, i \in N$  і використовуючи формули (23), можемо повернутися до вихідних змінних  $\tilde{x}_{ij}, (i,j) \in V$ , що і дає розподіл потоків, що мінімізує витрати під час транспортування води.

Використовуючи (23), конкретизуємо вигляд функції  $\Phi$ :

$$\Phi = \sum_{(i,j) \in V} \varphi_{ij}(p_{ij}) - \sum_{i \in N} \psi_i(p_i), \quad (24)$$

де

$$\varphi_{ij}(p_{ij}) = \begin{cases} \frac{1}{2} l_{ij} (b_{ij}^-)^2 + p_{ij} r_{ij}^-, & \text{якщо } p_{ij} \leq r_{ij}^- l_{ij}, \\ -\frac{1}{2} \frac{p_{ij}^2}{l_{ij}}, & \text{якщо } r_{ij}^- l_{ij} \leq p_{ij} \leq r_{ij}^+ l_{ij}, \\ \frac{1}{2} l_{ij} (r_{ij}^+)^2 + p_{ij} r_{ij}^+, & \text{якщо } p_{ij} \geq r_{ij}^+ l_{ij}, \end{cases}$$

$$\psi_i(p_i) = p_i^+ d_i^+ - p_i^- d_i^-.$$

Враховуючи сказане вище,  $\varphi'_{ij}(p_{ij}) = x_{ij}(p_{ij})$ .

Остаточно, похідні цільової функції двоїстої задачі дорівнюють

$$\frac{d\Phi}{dp_i^+} = \sum_{j \in N} (\alpha_{ij} - \alpha_{ji}) x_{ij} - \sum_{j \in N} (\alpha_{ji} - \alpha_{ij}) x_{ji} + d_i^+,$$

$$\frac{d\Phi}{dp_i^-} = \sum_{j \in N} (\alpha_{ji} - \alpha_{ij}) x_{ij} - \sum_{j \in N} (\alpha_{ij} - \alpha_{ji}) x_{ji} - d_i^-.$$

Таким чином, ми перейшли від вихідної задачі до двоїстої задачі з простими обмеженнями

$$\max \Phi, \quad (25)$$

$$p_i^+ \geq 0, p_i^- \geq 0, i \in N. \quad (26)$$

Цільова функція двоїстої задачі (25), (26) має неперервні похідні і ці похідні ми можемо обчислити. Отже, маємо можливість застосувати довільний метод оптимізації, модифікований із врахуванням простих обмежень (26). Зокрема це може бути метод спряжених градієнтів.

Позначимо  $p^+ = \{p_1^+, \dots, p_N^+\}$ ,  $p^- = \{p_1^-, \dots, p_N^-\}$ . Тоді  $p = \{p^+, p^-\}$ ,  $p \in R^{2N}$  — вектор двоїстих змінних. Введемо позначення також для множини індексів двоїстих змінних  $J = \{1, 2, \dots, 2N\}$ .

Загальна ідея розв'язання задачі (25), (26) полягає в упорядкованому переборі граней допустимої множини. Задаємо довільну точку, що задовольняє нерівностям (26). Виділяємо серед обмежень ті, що задовольняються як рівності. Ці обмеження визначають деяку грань багатогранної множини. Знаходимо максимум  $\Phi(p)$  на цій грані, застосовуючи метод спряжених градієнтів. Отримуємо точку, яка є розв'язком поставленої задачі, інакше

можна вказати перехід на деяку нову грань, після чого процедура повторюється. Ця нова грань утворюється у випадку, якщо одне або декілька обмежень-нерівностей обертаються у рівності, тобто приєднуються до активного набору.

Опишемо дії на одній зовнішній ітерації процесу розв'язання задачі (25), (26), беручи до уваги, що внутрішніми ітераціями будуть кроки алгоритму спряжених градієнтів для вгнутих функцій

$$p^{s+1} = p^s + \beta_s z^s, \quad (27)$$

де

$$z^0 = \Phi(p^0), \quad z^s = \Phi'(p^s) + \frac{\langle \Phi'(p^s), \Phi'(p^s) - \Phi'(p^{s-1}) \rangle}{\langle \Phi'(p^{s-1}), z^s \rangle} z^{s-1}, \quad s > 0,$$

а вибір множника  $\beta_s$ , на кожному  $s$  кроці здійснюється з вимоги  $\Phi(p^s + \beta_s z^s) = \max_{\beta \geq 0} \Phi(p^s + \beta z^s)$ .  $s = 0, 1, 2, \dots$

Нагадаємо, що необхідні та достатні умови того, аби точка  $p^*$  була розв'язком задачі (25, 26) описуються співвідношеннями:

$$(\Phi'(p^*))_k = 0, \quad \text{якщо } p_k^* > 0, \quad k \in J, \quad (28)$$

$$(\Phi'(p^*))_k \leq 0, \quad \text{якщо } p_k^* = 0, \quad k \in J,$$

де  $(\Phi'(p))_k$  —  $k$ -та компонента вектора  $\Phi'(p)$ .

Покладемо  $J(p) = \{k : p_k = 0, k \in J\}$ . Починаємо з довільної точки  $p^0$ , що задовольняє обмеженням  $p_k^0 \geq 0, k \in J$ . Знайдемо множину  $J(p^0)$ . Якщо  $(\Phi'(p^0))_k = 0, i \notin J(p^0)$ , то це означає, що точка  $p^0$  є точкою мінімуму  $\Phi(p)$  за обмежень  $p_i = 0, i \in J(p^0)$ . Якщо до того ж  $(\Phi'(p^0))_k \leq 0$  для  $k \in J(p^0)$ , то  $p^0$  є розв'язком задачі (25), (26), оскільки в цій точці виконано необхідні й достатні умови максимуму (28).

Якщо  $(\Phi'(p^0))_k > 0$  для деяких  $k \in J(p^0)$ , то покладемо  $J' = \{i \in J(p^0) : (\Phi'(p^0))_k \leq 0\}$  і будемо застосовувати метод спряжених градієнтів для максимізації  $\Phi(p)$ , беручи за змінні тільки  $p_k, k \notin J'$  і залишаючи всі  $p_k$  рівними нулю для  $k \in J'$ . Якщо ж існують такі індекси  $k$ , що  $(\Phi'(p^0))_k \neq 0, i \notin J(p^0)$ , то в цьому випадку покладемо  $J' = J(p^0)$ .

При цьому ми весь час маємо контролювати виконання обмежень  $p_k > 0, k \in J \setminus J'$ . Якщо крок методу спряжених градієнтів призводить до від'ємності однієї з цих змінних, то довжина кроку обмежується таким чином, аби в точності обернути цю змінну в нуль. Для цього при обчисленнях за методом спряжених градієнтів весь час додатково обчислюємо величину  $\bar{\beta}_s$ :



$$\bar{\beta}_s = \min_k \left( -\frac{p_k^s}{z_k^s} \right), \quad (29)$$

де мінімум береться по всіх  $k \in J \setminus J'$ , для яких  $z_k^s < 0$ , і порівнюємо цю величину з  $\beta_s$ .

Якщо  $\beta_s < \bar{\beta}_s$ , то

$$p_k^{s+1} = p_k^s + \beta_s z_k^s, \quad k \notin J', \quad p_k^{s+1} = p_k^s = 0, \quad k \in J'. \quad (30)$$

Якщо  $\beta_s \geq \bar{\beta}_s$ , то

$$p_k^{s+1} = p_k^s + \bar{\beta}_s z_k^s, \quad k \notin J', \quad p_k^{s+1} = p_k^s = 0, \quad k \in J'. \quad (31)$$

Процес обчислень перерветься за скінчене число кроків. При цьому або буде знайдено точку  $p^{s+1}$  таку, що в ній  $\Phi(p)$  досягає мінімуму при умовах  $p_k = 0$ ,  $k \in J'$ , або таку, де  $\beta_s \geq \bar{\beta}_s$ , тобто якесь із неактивних обмежень порушується. В останньому випадку  $J(p_k^{s+1}) \supset J'$ , причому існують  $k \in J(p_k^{s+1})$ , такі що  $k \notin J'$ . В обох випадках точка  $p_k^{s+1}$ , отримана за процедурою (30) або (31) вважається за початкову і процес повторюється.

Метод спряжених градієнтів будує послідовність точок, в яких цільова функція монотонно зростає. Саме це гарантує, що число граней є скінченим, тому що активні набори не можуть повторюватися.

## ОЦІНКА ШВИДКОСТІ ЗБІЖНОСТІ

Як показано вище, запропонований у попередньому розділі алгоритм здійснює пошук розв'язку шляхом перебору скінченної кількості граней. Це означає, що збіжність процесу в цілому залежить від збіжності методу спряжених градієнтів при максимізації на відповідній грані. Функція (24) є кусково-квадратичною. Отже, є справедливою

**Теорема 2.** Якщо точка максимуму  $p^*$  кусково-квадратичної функції (24) двоїстої задачі (25), (26) належить квадратичній складовій, то метод збігається за скінчене число кроків. Якщо ж точка  $p^*$  є місцем поєднання декількох квадратичних функцій, то процес збігається зі швидкістю методу спряжених градієнтів для вгнутих функцій.

## ВИСНОВКИ

Формулювання проблеми розподілу ресурсів у вигляді оптимізаційної задачі дозволяє не тільки вирішити питання задоволення споживачів, але й мінімізувати витрати на транспортування. Крім того, перевагою такої математичної моделі є незалежність методу розв'язання задачі від структури графа, що дає можливість описувати зрошувальні системи складної структури, з довільною кількістю замкнених циклів.

Відмітимо, що запропоновану теорію можна застосовувати до широкого кола розподільчих мереж. Так, у випадку транспортування газу в магістральних трубопроводах виникає задача утримання (10), де  $h_i(t)$  — тиск газу в певній точці трубопроводу;  $H_i$  — початковий тиск перед  $i$ -ю станцією підкачки;  $h_i(l_i, t)$  — тиск газу у кінці  $i$ -го проміжку трубопроводу;  $c_i$  та  $k_i$  — коефіцієнти, які зв'язують тиск і витрати газу у  $i$ -му проміжку трубопроводу  $q_i$ ;  $\tau_i$  — час проходження хвилею  $i$ -го проміжку трубопроводу;  $\alpha_i$  — коефіцієнт згасання для  $i$ -го проміжку трубопроводу.

Моделювання процесу розподілу потоків здійснюється за допомогою задачі квадратичного програмування. За наявності більш складної нелінійної функції цілі можна замінити вихідну задачу послідовністю задач квадратичного програмування, що будуть апроксимувати, у певному сенсі, вихідну задачу, як це робиться для потокових задач з класичним законом збереження [8, 9].

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Остапенко В.В., Павлыгин А.И. Динамические потоки в сетях для обобщенного закона Кирхгофа // Кибернетика и системный анализ. — 1996. — № 3. — С. 96–102.
2. Остапенко В.В., Павлыгин А.И. Линейные неравенства для обобщения закона Кирхгофа // Кибернетика и системный анализ. — 1997. — № 3. — С. 130–148.
3. Остапенко В.В., Финин Г.С. Моделирование движения воды с обобщенным законом Кирхгофа // Проблемы управления и автоматизи. — 1999. — № 4. — С. 86–90.
4. Остапенко В.В., Скопецкий В.В., Фінін Г.С. Розподіл ресурсів у просторі та часі. — Київ: Наук. думка, 2003. — 322 с.
5. Картвелишвили Н.А. Потоки в недеформируемых руслах. — Л.: Гидрометеиздат, 1978. — 279 с.
6. Данильченко В.Е., Остапенко В.В., Яковлева А.П. Математические вопросы моделирования и управления в задачах водораспределения. — Киев, 1989. — 18 с. (Препр. / АН УССР. Ин-т кибернетики им. В.М. Глушкова; 89-14).
7. Пшеничный Б.Н. Выпуклый анализ и экстремальные задачи. — М.: Наука, 1980. — 320 с.
8. Кірік О.С. Алгоритми лінеаризації та спряжених градієнтів для нелінійних задач розподілу потоків // Наук. вісті НТУУ «КПІ», 2007. — № 3. — С. 67–73.
9. Кірік О.С. Алгоритми ітераційного квадратичного програмування для задач оптимального розподілу потоків // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2008. — № 1. — С. 101–113.

Надійшла 18.03.2010

## **КЕРУВАННЯ ОДНОСТОРОННІМИ ПРОЦЕСАМИ ФІЛЬТРАЦІЇ В'ЯЗКИХ НАФТ ЗА НАЯВНОСТІ ГРАНИЧНОГО ГРАДІЄНТА ТИСКУ**

**І.В. ЖДАНОВА, О.М. НОВІКОВ**

Запропоновано алгоритм керування одностороннім процесом із багатозначною перешкодою в області. Модель процесу представлено у вигляді варіаційної нерівності із негладким функціоналом відповідності. Алгоритм застосовано до задачі керування процесом фільтрації нафти в умовах наявності граничного градієнта тиску.

### **ВСТУП**

У багатьох галузях промисловості та навколишньому середовищі зустрічаються процеси, що мають назву односторонніх. На відміну від класичних процесів математичної фізики, які називаються двосторонніми, ці процеси характеризуються наявністю специфічних ефектів односторонньої провідності границі або перешкоди в області протікання процесу. Ефективним представленням таких процесів постають варіаційні нерівності [1, 2].

Задача керування односторонніми процесами розглядалась в [3], де було запропоновано алгоритм керування одностороннім процесом із односторонньою провідністю границі (випадок товстої стінки границі) та м'якою перешкодою в області. Але розповсюдження алгоритму на клас процесів із м'якою багатозначною перешкодою в області не проводилось. Явище м'якої багатозначної перешкоди притаманне рідинам, тоді як явище м'якої перешкоди характерне для газоподібних середовищ. Аналітично в моделі процесу наявність м'якої багатозначної перешкоди описується функціоналом відповідності, який не є неперервно диференційованим.

**Мета роботи** — побудова алгоритму керування для класу процесів із м'якою багатозначною перешкодою в області. В роботі [4] було запропоновано підхід до моделювання процесів в умовах багатозначної функції перешкоди, яка є узагальненою похідною від негладкого функціоналу відповідності. Цей підхід використано при побудові алгоритму керування одностороннім процесом у цій роботі.

Практичне значення має задача керування односторонніми процесами із м'якою багатозначною перешкодою, зокрема, деякими з них, які мають місце у нафтодобувній промисловості. Серед цих процесів слід виокремити процеси фільтрації нафти при наявності граничних градієнтів тиску, що відбуваються у в'язких нафтах із високим вмістом парафінів та смолистих речовин [5, 6].

За допомогою співвідношень, які одержано в цій роботі, розв'язується одна з актуальних задач керування односторонніми процесами в нафтодобувній промисловості, а саме, задача керування полем тисків у околі свердловини.

вини при відомих характеристиках пласта та нафти, яка має в'язкопластичні властивості та характеризується наявністю граничного градієнта тиску.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Родовище, що розглядається, характеризується наявністю односторонніх властивостей: ці властивості представлено нелінійними ефектами, які проявляються структуруванням у нафтах. А саме, при градієнтах тиску менших за граничне значення, в нафтовому пласті утворюються зони застою, у яких нафта втрачає рухливість.

Використаємо модель у вигляді варіаційної нерівності, запропоновану в [7]. У нашому випадку вона набуває такого вигляду:

$$\begin{aligned} & ((\beta_c + m(z)\beta_n) \frac{\partial u}{\partial t}, v - u) - \left( \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial z_i} b(z)k(z) \frac{\partial u}{\partial z_i}, v - u \right) + \psi(v) - \psi(u) \geq \\ & \geq \left( \frac{1}{h(z)} \sum_{j=1}^k q_j(t) \delta(z - z^j), v - u \right) \text{ в } Q = \Omega \times [0, T] \quad \forall v \in H^1(\lambda), \quad (1) \end{aligned}$$

з початковою умовою  $u(0) = u_0$ ,

де  $\beta_c$  — коефіцієнт стискання пористого середовища;  $\beta$  — коефіцієнт стискання нафти;  $m(z)$  — пористість середовища;  $b(z) = \frac{\rho}{\mu}$ , де  $\rho$  — густина нафти,  $\mu$  — в'язкість нафти,  $k$  — коефіцієнт проникності середовища,  $z = (z_1, z_2, z_3)$ ,  $h(z)$  — потужність пласта,  $q_j(t)$  — дебіти свердловин, що діють в підобластях  $\Omega_i \subset \Omega$ ,  $j = 1..K$ ,  $K$  — кількість свердловин, функціонал відповідності

$$\psi = \begin{cases} \xi(t, z)u, & |\partial u / \partial z| \leq u_{\text{гран}} , \\ 0, & |\partial u / \partial z| > u_{\text{гран}} , \end{cases} \quad (2)$$

при цьому у виразі (2) нижня гілка описує нормальне протікання процесу фільтрації, а верхня гілка відповідає «ввімкненню» перешкоди, яка призводить до утворення застійних зон. Коефіцієнт  $\xi$  — коефіцієнт перешкоди, який є заздалегідь невідомим і підлягає знаходженню в процесі розв'язання задачі.

Для того, щоб перейти від варіаційної нерівності (1) до задачі оптимізації, як це показано в [2], запишемо функцію багатозначної перешкоди як похідну від функціоналу (2):

$$\varphi = \begin{cases} \xi(t, z), & |\partial u / \partial z| < u_{|\partial u / \partial z| > u_{\text{гран}}} , \\ [\xi(t, z), 0], & |\partial u / \partial z| = u_{|\partial u / \partial z| > u_{\text{гран}}} , \\ 0, & |\partial u / \partial z| > u_{|\partial u / \partial z| > u_{\text{гран}}} . \end{cases}$$

Процес фільтрації нафти в цьому випадку є одностороннім процесом із м'якою багатозначною перешкодою [5].

Розв'яжемо задачу керування одностороннім процесом фільтрації нафти при наявності граничного градієнта тиску.

### РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ

Критерій штрафу, який забезпечує виконання односторонніх властивостей процесу, має вигляд:

$$J = \int_0^T \int_{\Omega} \left\{ \begin{array}{l} (\partial u / \partial t)^2, \quad |\partial u / \partial z| \leq u_{\text{гран}}, \\ (\xi(t, z) \partial u / \partial t)^2, \quad |\partial u / \partial z| \leq u_{\text{гран}} \end{array} \right\} dz dt \rightarrow \inf.$$

Використаємо апроксимацію на етапі введення локальної форми: у випадку використання похідних від  $\varphi$  (у виразах, наведених нижче) замість функції перешкоди  $\varphi$  будемо використовувати її гладку апроксимацію  $\varphi^*$ .

Критерій розв'язання задачі на першому етапі (етапі керування) представимо у вигляді:

$$J_1(u, f, \xi) = \frac{1}{2} \int_{\Omega_z} \int_{\Omega_r} u(T, z) Q_T(z, r) u(T, r) dz dr + \frac{1}{2} \int_0^T \int_{\Omega_z} \int_{\Omega_r} (u(t, z) Q(z, r) u(t, r) + f(t, z) R(z, r) f(t, r)) dt dz dr \rightarrow \inf, \quad (3)$$

де  $Q_T(z, r)$ ,  $Q(z, r)$ ,  $R(z, r)$  — відомі додатньо визначені оператори. При цьому повинно бути  $J_1(u, f, \xi) \rightarrow \inf$ .

Розв'язок задачі оптимального керування системою приймає вигляд:

$$f(t, z) = \int_{\Omega_r} \int_{\Omega_\rho} R^*(z, r) s(t, r, \rho) u(t, \rho) dr d\rho, \quad (4)$$

де  $R^*(z, r)$  — ядро, обернене до  $R(z, r)$  таке, що  $\int_{\Omega} R^*(z, r) R(r, \rho) dr = \delta(z - \rho) I$ , а функція  $s(t, z, r)$  визначається з рівняння Ріккати та має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{\partial s(t, z, r)}{\partial t} = & -F(z) s(t, z, r) - \frac{\partial \varphi^*(u, \xi)}{\partial u} s(t, z, r) \Big|_z - F(r) s(t, z, r) - \\ & - \frac{\partial \varphi^*(u, \xi)}{\partial u} s(t, z, r) \Big|_r + \int_{\Omega_\rho} \int_{\Omega_\gamma} R^*(\gamma, \rho) s(t, z, \gamma) s(t, \rho, r) d\rho d\gamma - Q(z, r), \end{aligned} \quad (5)$$

де оператор  $F(\cdot) = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial(\cdot)_i} \left( k^*(\cdot) \frac{\partial}{\partial(\cdot)_i} \right)$ , а граничні та кінцеві умови мають вигляд:

$$\begin{aligned} s(t, z, r) \Big|_{\Gamma_z} &= 0, \\ s(t, z, r) \Big|_{\Gamma_r} &= 0, \quad s(T, z, r) = Q_T(z, r). \end{aligned} \quad (6)$$

Перейдемо до етапу оцінювання. Нехай відомий результат першого кроку —  $\{\hat{u}, \hat{s}, \hat{f}\}$ . Зафіксуємо керуючу змінну  $f$ . При цьому критерій  $J_2(u, s, f, \xi) \rightarrow \inf$  визначається виразом (7). В якості обмежень виступають рівняння (8), (9). На другому етапі при оцінюванні невідомого параметра процесу розглянемо задачу мінімізації функціонала

$$J_2 = \int_0^T \int_{\Omega_z} F_1\left(\frac{\partial u}{\partial t}, \frac{\partial u}{\partial z}\right) dz dt \rightarrow \inf_{\xi} \quad (7)$$

при обмеженнях на  $u, s$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} k^* \frac{\partial u}{\partial z} + \phi^*(u, \xi) - \int_{\Omega_\alpha} \int_{\Omega_\beta} R^*(z, \alpha) s(t, \beta, \alpha) u(t, \beta) d\alpha d\beta = 0, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} k^*(x) \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k^*(y) \frac{\partial u}{\partial y} + \left[ \frac{\partial \phi^*(u, \xi)}{\partial u} \Big|_{u=u(x)} + \frac{\partial \phi^*(u, \xi)}{\partial u} \Big|_{u=u(y)} \right] s(t, x, y) - \\ - \int_{\Omega_\alpha} \int_{\Omega_\beta} s(t, x, \alpha) R^*(\alpha, \beta) s(t, y, \beta) d\alpha d\beta + Q(x, y) = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

з початковими і граничними умовами

$$\begin{aligned} u|_{t=0} = u^0(z); \quad u|_{z \in \partial\Omega} = u^{\text{гран}}, \\ s|_{t=0} = s^0(x, y), \quad s(t, x, y)|_{x \in \partial\Omega_x} = s^{\text{гран}}, \\ s(t, x, y)|_{y \in \partial\Omega_y} = s^{\text{гран}}. \end{aligned}$$

Введемо наступні позначення:  $\psi_0 = u$ ,  $\psi_1 = \frac{\partial u}{\partial t}$ ,  $\psi_{i+1} = \frac{\partial u}{\partial z_i}$ ,  $i = 1, 2, 3$ .

Вираз (8) набуде вигляду:

$$\frac{\partial \psi_0}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial \psi_0}{\partial z} \right) + \phi^*(\psi_0, \xi) - \int_{\Omega_\alpha} \int_{\Omega_\beta} R^*(z, \alpha) s(t, \beta, \alpha) \psi_0(t, \beta) d\alpha d\beta = 0.$$

Диференціюючи (8) по  $t$  та покладаючи  $\psi_1 = \frac{\partial u}{\partial t}$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial \psi_1}{\partial z} \right) + \frac{\partial \phi^*}{\partial u} \Big|_{u=\psi_0} \psi_1 - \int_{\Omega_\alpha} \int_{\Omega_\beta} R^*(z, \alpha) [s(t, \beta, \alpha) \psi_1(t, \beta) + \\ + \frac{\partial s(t, \beta, \alpha)}{\partial t} \psi_0(t, \beta)] d\alpha d\beta = 0. \end{aligned}$$

Диференціюючи (8) по  $z_i$  та покладаючи  $\psi_{i+1} = \frac{\partial u}{\partial z_i}$  ( $i = 2, 3, 4$ ):

$$\frac{\partial \psi_{i+1}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left( k(z) \frac{\partial \psi_{i+1}}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z_k} \left( \psi_{i+1} \frac{\partial k}{\partial z_i} \right) + \frac{\partial \phi^*}{\partial u} \psi_{i+1} -$$

$$- \int_{\Omega_\alpha} \int_{\Omega_\beta} \frac{\partial R^*(z, \alpha)}{\partial z_{i-1}} s(t, \beta, \alpha) \psi_0(t, \beta) d\alpha d\beta.$$

Для  $s$  маємо вихідне рівняння ( $s = s(t, x, y) \equiv s^{(0)}$ )

$$\begin{aligned} \frac{\partial s^{(0)}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (k(x) \frac{\partial s^{(0)}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k(y) \frac{\partial s^{(0)}}{\partial y}) + B(\psi(x), \psi(y), \xi) s^{(0)}(t, x, y) + \\ + Q(x, y) - \int_{\Omega_\alpha} \int_{\Omega_\beta} s^{(0)}(t, x, \alpha) R^*(\alpha, \beta) s^{(0)}(t, y, \beta) d\alpha d\beta = 0, \end{aligned}$$

$$\text{де } B(\psi, \xi) \equiv \left. \frac{\partial \varphi^*}{\partial u} \right|_{u=\psi_0(x)} + \left. \frac{\partial \varphi^*}{\partial u} \right|_{u=\psi_0(y)}.$$

Також слід додати рівняння для  $s^{(1)} \equiv \frac{\partial s}{\partial t}$ , яке отримується диференціюванням за часом  $t$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial s^{(1)}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (k(x) \frac{\partial s^{(1)}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k(y) \frac{\partial s^{(1)}}{\partial y}) + B(\psi, \xi) s^{(1)}(t, x, y) = \\ = \int_{\Omega_\alpha} \int_{\Omega_\beta} \{s^{(1)}(t, x, \alpha) R^*(\alpha, \beta) s^{(0)}(t, y, \beta) + s^{(0)}(t, x, \alpha) R^*(\alpha, \beta) s^{(1)}(t, y, \beta)\} d\alpha d\beta. \end{aligned}$$

Тепер перепозначимо змінні, вводячи компоненти  $S_{ik}, R_{pq}^*, B_{pq}, Q_{ik}$  таким чином, що вихідна задача, де в критерії (7) містяться похідні, зводиться до задачі:

$$J_2 = \int_0^T \int_{\Omega} F(\psi) dz dt \rightarrow \inf_{\xi}$$

$$\frac{\partial \psi_i}{\partial t} + A_z \psi_i + \varphi_i(\psi, \xi) - \int_{\Omega_\alpha} \int_{\Omega_\beta} R_{ip}^*(z, \alpha) s_{pk}(t, \beta, \alpha) \psi_k(t, \beta) d\alpha d\beta = 0,$$

$$A(\cdot) = \frac{\partial}{\partial z} k(z) \frac{\partial (\cdot)}{\partial z}, \quad \psi|_{t=0} = \psi_0(z); \quad \psi|_{\partial\Omega} = \psi_{\text{гран}}(z, t)|_{z \in \partial\Omega},$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial s_{ik}(t, x, y)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k(x) \frac{\partial s_{ik}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k(y) \frac{\partial s_{ik}}{\partial y} \right) + B_{ir}(\psi(x), \psi(y), \xi) s_{rk}(t, x, y) + \\ + Q_{ik}(t, x, y) = \int_{\Omega_\alpha} \int_{\Omega_\beta} \{s_{iq}(t, x, \alpha) R_{qp}^*(\alpha, \beta) s_{qp}(t, \beta, y)\} d\alpha d\beta, \end{aligned}$$

$$s_{ik}(t, x, y)|_{t=0} = s_{ik}^0(x, y), \quad s_{ik}(t, x, y)|_{x \in \partial\Omega} = s^{\text{гран}}, \quad s_{ik}(t, x, y)|_{y \in \partial\Omega} = s^{\text{гран}}.$$

Розв'язуючи таку вихідну задачу методом Лагранжа, отримуємо:

$$L = \int_0^T \int_{\Omega_z} F(\psi(z)) dz dt + \int_0^T \int_{\Omega_z} \Phi_i(z) \left\{ \frac{\partial \psi_i}{\partial t} + A_z \psi_i + \varphi_i(\psi, \xi) - \right.$$

$$\begin{aligned}
 & - \int_{\Omega_\alpha} \int_{\Omega_\beta} R_{ip}^*(z, \alpha) s_{pk}(t, \beta, \alpha) \psi_k(t, \beta) \Bigg\} dz dt + \int_0^T \int_{\Omega_x} \int_{\Omega_y} K_{ik}(t, x, y) \Bigg\{ \frac{\partial s_{ik}}{\partial t} + \\
 & + \frac{\partial}{\partial x} \left( k(x) \frac{\partial s_{ik}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k(y) \frac{\partial s_{ik}}{\partial y} \right) + B_{ir}(\psi(x), \psi(y), \xi) s_{rk}(t, x, y) + \\
 & + Q_{ik}(t, x, y) - \int_{\Omega_\alpha} \int_{\Omega_\beta} s_{iq}(t, x, \alpha) R_{pq}^*(\alpha, \beta) s_{pk}(t, \beta, y) d\alpha d\beta \Bigg\} dx dy.
 \end{aligned}$$

Варіюючи  $L$ , одержимо необхідні умови екстремуму:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial L}{\partial \xi} = & \int_0^T \int_{\Omega_z} \Phi_i(z) \frac{\partial \varphi_i^*(\psi, \xi)}{\partial \xi} dt dz + \int_0^T \int_{\Omega_x} \int_{\Omega_y} \frac{\partial B_{ir}}{\partial \xi}(\psi(x), \psi(y), \xi) \times \\
 & \times s_{rk}(t, x, y) K_{ik}(t, x, y) dx dy dt.
 \end{aligned} \tag{10}$$

Невідомий параметр  $\xi$  знаходиться за допомогою градієнтної процедури

$$\xi^{i+1} = \xi^i - \lambda \left( \frac{\partial L}{\partial \xi} \right)^i, \tag{11}$$

$\lambda$  — параметр градієнтної процедури,

$$\frac{|J_2^i - J_2^{i+1}|}{J_2^i} \leq \varepsilon, \tag{12}$$

а параметр процесу, що знаходиться таким чином, приймає значення  $\hat{\xi}$ . Отже, отримано розв'язок  $\{\hat{u}, \hat{\xi}\}$ .

Загальний алгоритм оптимального керування та оцінювання параметра функції відповідності приймає вигляд:

1. Для кроку поточної ітерації  $i = 0$  процедури оцінювання параметра функції відповідності, задаємо даному невідомому параметру початкове довільне значення  $\xi^0$ .

2. Для відомого фіксованого значення  $\xi^i$  розв'язується задача оптимального керування.

3. Для відомого  $f^i$  на основі (10) визначаємо  $\left( \frac{\partial L}{\partial \xi} \right)^i$ , де  $u^i$  визначається у п. 2,  $\Phi$ ,  $K$  визначаються умовами  $\frac{\delta L}{\delta \psi_i} = 0$ ,  $\frac{\delta L}{\delta s} = 0$ .

4. Для кроку  $i + 1$  на основі (11) визначаємо значення  $\xi^{i+1}$ .

5. Перевіряємо умову (12). Якщо вона виконується, переходимо до п. 6, якщо вона не виконується — покладаємо  $\xi^{i+1} := \xi^i$  та переходимо до п. 2.

6. Закінчення алгоритму.



На основі запропонованих співвідношень було проведено обчислювальний експеримент. Результати експерименту показали, що коефіцієнт перешкоди в результаті градієнтної процедури настраюється до ненульових значень в областях, в яких виконуються такі умови: градієнт тиску менше граничного та спостерігається збурення тиску від свердловин. В околі розташування свердловин градієнт у більшості випадків перевищує граничне значення. Відповідно, у цьому околі коефіцієнт перешкоди дорівнює нулю, також близькі до нульових значення відповідають областям, де вплив від джерел збурення тиску стає майже непомітним.

При проведенні експерименту використано наступні вихідні дані: вихідний стан  $u_0 = 100$  Па; граничне значення градієнта тиску  $u_{\max} = 0,5$  Па; коефіцієнт проникності  $k = 62,5$  кг/м<sup>3</sup>; густина  $\rho = 800$  кг/м<sup>3</sup>; в'язкість  $\mu = 10^{-3}$  Пас; інтенсивність добувної свердловини  $f = 40$  м<sup>3</sup>/добу; позиції свердловин: (30,50), (40,50), (40,40), (40,60), (40,70), (40,100), (50,40), (50,50), (50,60), (50,70), (60,40), (60,50); розміри пласта 300 м × 300 м; потужність пласта  $h = 1$  м; пористість  $m = 20\%$ ; коефіцієнт стискання середовища  $\beta_c = 10^{-1}$  Па<sup>-1</sup>; коефіцієнт стискання нафти  $\beta_n 10^{-1}$  Па<sup>-1</sup>.

Під час обчислень було використано такі параметри градієнтної процедури: точність —  $\varepsilon = 10^{-2}$ ; початкове значення параметра перешкоди —  $\xi^0 = 0$ ; крок градієнтної — процедури  $\lambda = 10^{-4}$ . Критерій оптимального керування має вигляд:  $J_1 = \int_0^T \int_{\Omega} (u(t, z) - u_{\text{задане}})^2 dt dz$ ;  $u_{\text{задане}} = 80$ .

На рис. 1–2 поведінка процесу ілюструється на ділянці, яка вміщує джерела від'ємного нагнітання тиску. На етапі розробки пласта, що розглядається, наявні лише добувні свердловини, а нагнітаючі свердловини, які слугують для «підтискання» нафти до добувних свердловин шляхом закачування у пласт води, відсутні. При цьому;  $u^*(t) = u(z_1^*, z_2^*, t)$ ;  $z_1^* = 50$  м;  $z_2^* = 80$  м,  $q(t)$  — дебіт свердловини,  $k$  — крок ітераційної процедури.

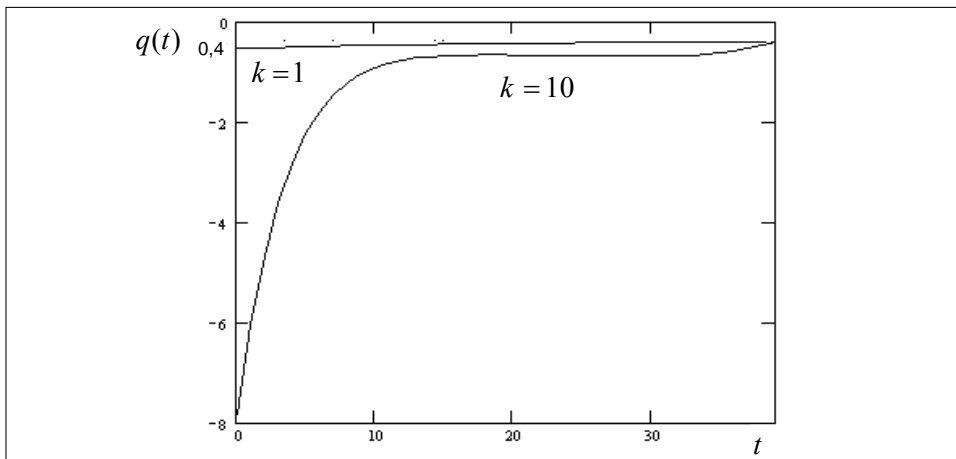


Рис. 1. Налаштування зовнішнього впливу під час градієнтної процедури (дебіт свердловини)

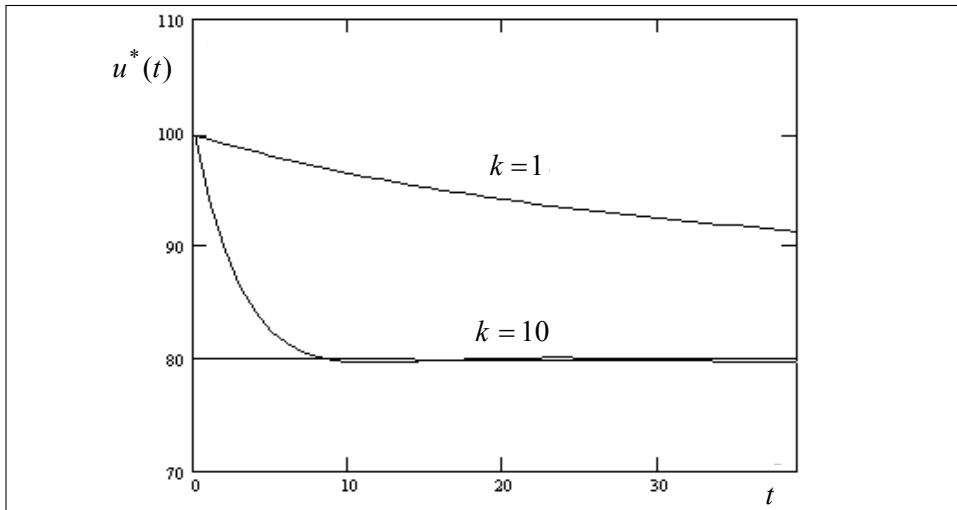


Рис. 2. Тиск у характерній точці на першому ( $k = 1$ ) та останньому ( $k = 10$ ) кроках градієнтної процедури

Між рис. 3 та рис. 4 спостерігається наступна відповідність (див. останній крок процедури): коли модуль градієнта менший за критичне значення (відмітка 0,5), вмикається функція перешкоди, коефіцієнт якої приймає ненульове значення — це відповідає утворенню застійних явищ у нафті. Перешкода зникає при значеннях градієнта більших за 0,5.

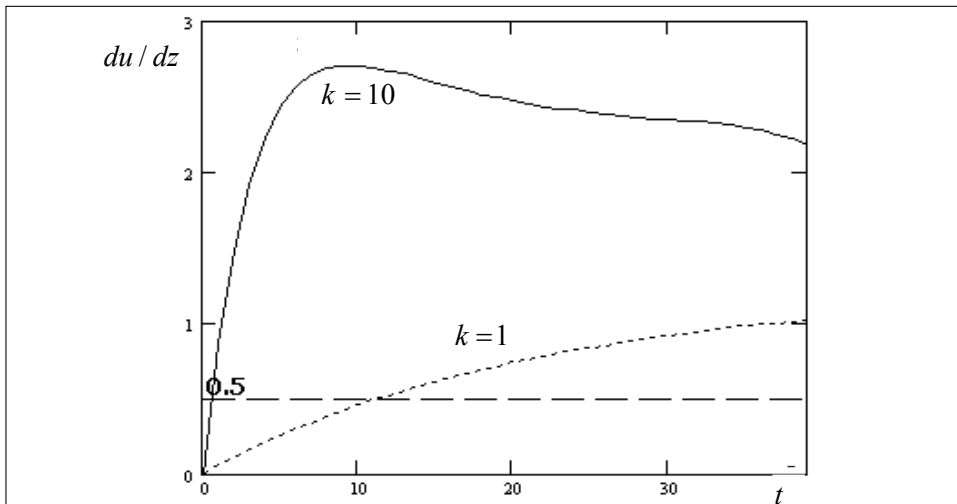


Рис. 3. Модуль градієнта тиску на першому ( $k = 1$ ) та останньому ( $k = 10$ ) кроках градієнтної процедури

Період прогнозування складав 40 діб, процедуру настройки завершено при значенні критерію завершення  $10^{-2}$  одиниць.

## ВИСНОВКИ

Серед одержаних результатів особливе значення має відновлення місцезнаходження меж перешкоди, на яких значення градієнта тиску приймає

граничне значення, а тиск неперервно змінюється при переході крізь таку границю. Знаходження розташування границі, яка розмежовує області із класичною поведінкою, та області із проявленням односторонніх ефектів дає змогу визначити місцезнаходження застійних зон. Такі дані відіграють важливу роль у керуванні процесом видобутку нафти.

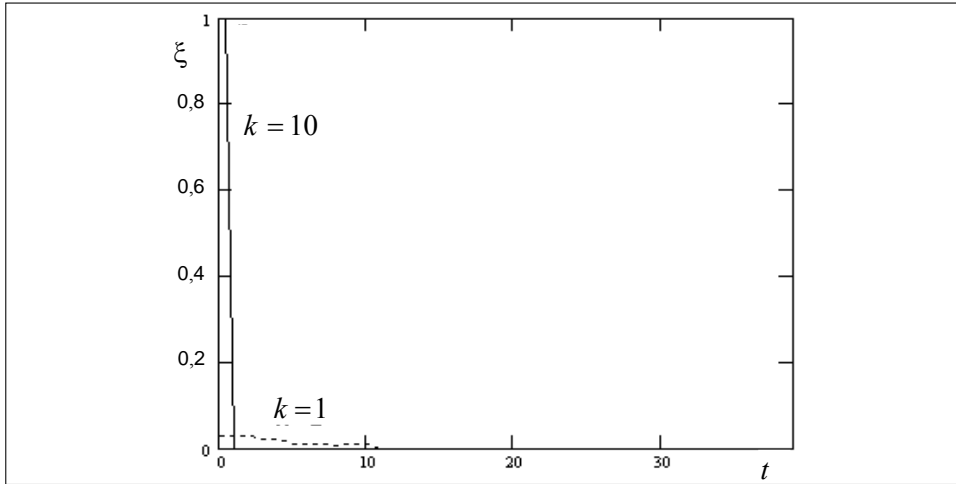


Рис. 4. Коефіцієнт перешкоди на першому ( $k=1$ ) та останньому ( $k=10$ ) кроках градієнтної процедури

Отримані в роботі результати можуть бути в подальшому розвинені на випадок, коли керування має не миттєвий вплив на процес, а середовище реагує на нього із деяким запізненням.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Дюво Г., Лионс Ж.-Л. Неравенства в механике и физике. — М.: Наука, 1980. — 383 с.
2. Згуровский М.З., Мельник В.С., Новиков А.Н. Прикладные методы анализа и управления нелинейными процессами и полями. — Киев: Наук. думка, 2004. — 588 с.
3. Згуровский М.З., Новиков А.Н. Анализ и управление односторонними физическими процессами. — Киев: Наук. думка, 1996. — 327 с.
4. Жданова І.В., Новіков О.М. Апроксимаційний підхід до розв'язання односторонніх задач із негладкими функціоналами відповідності // Наук. вісті НТУУ «КПІ». — 2004. — № 5. — С. 127–135.
5. Бернадинер М.Г., Ентов В.М. Гидродинамическая теория фильтрации аномальных жидкостей. — М.: Наука, 1975. — 200 с.
6. Скворцов Э.В. Подземная гидромеханика аномальных жидкостей. — Казань: Изд-во. Казан. ун-та, 1985. — 220 с.
7. Жданова І.В., Новіков О.М. Моделювання процесів фільтрації нафти з наявністю граничного градієнту тиску // Системні технології. — 2004. — № 5(34). — С. 111–119.

Надійшла 08.10.2009

## **ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ КОНЦЕПЦІЇ КОРПОРАЦІЙНОЇ ЕКОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ІНТЕГРАЛЬНОЇ ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНОГО РИЗИКУ ЗДОРОВ'Ю**

**Т.В. КОЗУЛЯ, Н.В. ШАРОНОВА**

Надано теоретико-практичні засади необхідності й доцільності введення в систему прийняття управлінського рішення концепції корпоративної екологічної системи (КЕС). Визначено математичні підходи до встановлення взаємодії між складовими КЕС і встановлення ризику порушень у результаті виникнення негативного фактора впливу, запровадження оцінки ризику здоров'ю як критерію небезпеки соціально-економічної системи. Надано алгоритм визначення стану КЕС на основі оцінки ризику.

### **ВСТУП**

Метою концепції корпоративного підходу у вирішенні еколого-гігієнічних задач щодо зменшення кількості та мінімізації соціально-економічних наслідків надзвичайних ситуацій техногенного і природного походження в Україні є застосування сучасних методів регулювання техногенної та природної безпеки на основі ризик-орієнтованого підходу, забезпечення гарантованого прийняттого рівня здоров'я населення, екологічної комфортності територій, соціальних, техногенних та природних об'єктів.

Нормування ризиків є спеціально організованою нормативно-правовою діяльністю із розроблення й затвердження норм техногенної і природної безпеки, правил і регламентів господарської діяльності, які визначаються на основі значень ризику в межах прийнятних значень. Нормування є процесом регулювання екологічної якості навколишнього середовища у державі на основі обмеження техногенної діяльності та забезпечення прийнятних для здоров'я людини впливів на її організм як природних явищ, так і антропогенних факторів.

Розробка санітарно-гігієнічних нормативів впливів забруднення навколишнього природного середовища та їх опрацювання проводиться відповідно до припущення, що забруднюється якимсь одне біогеохімічне середовище. Саме таким чином встановлено й впроваджено в практику екологічного контролю нормативи граничнодопустимих концентрацій (ГДК) техногенних сполук для атмосферного повітря, поверхневих вод, ґрунту. Оцінка впливу господарських проектів на навколишнє природне середовище, яка встановлена відповідно до діючих норм ГДК, є точковою та екстериторіальною і має значні неточності і похибки у визначенні наслідків дії негативних факторів [1].

Новим напрямком комплексного санітарно-гігієнічного нормування є розробка системи показників, яка визначатиме загальну характеристику екологічної чистоти води, повітря та ґрунту соціально-еколого-економічної системи. Систему таких нормативів представлено переліком показників із

встановленими межами чи сумарними відносними показниками (індексами якості). Екологічно прийнятні показники цієї системи нормативів перебувають на стадії експериментальних розробок, не мають сили, але вже використовуються проєктувальниками.

## ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

**Мета роботи** — дослідження проблемних питань системи управління екологічною якістю навколишнього середовища щодо розробки підходів із визначення оцінки екологічного ризику природному стану території та ризику здоров'ю населення на основі концепції корпоративної екологічної системи (КЕС) і застосування позитивного ризику як оціночної характеристики [2].

Загальний зв'язок між підсистемами КЕС передбачає певний вплив небезпеки і ризику негативних зрушень однієї складової на іншу, виникнення негативних процесів у цілому в корпоративній системі. Задачею даного етапу роботи є розробка алгоритму визначення загальної оцінки стану КЕС відповідно до запропонованих підходів і прийняття відповідного управлінського рішення.

## СУТНІСТЬ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Ризик є одним із можливих засобів вираження невизначеності під час оцінки поведінки системи. Більшість існуючих методик оцінює скалярний чи однокомпонентний ризик. З позицій корпоративного підходу щодо визначення стану функціонування інтегрованих системи необхідно враховувати всі ризики — економічний, соціальний, екологічний (у вигляді ризику здоров'ю населення від дії шкідливих факторів як соціально-економічної системи, так і природної екологічної). Це комплексний ризик, який містить такі складні величини як екологічний ризик, що представлено екологотоксикологічним і еколого-матеріальним ризиком [3, 4]. Традиційно ризик будь-якого результату визначають як добуток його ймовірності на його величину (рис. 1).

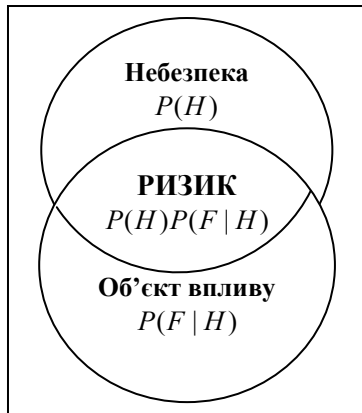


Рис. 1. Схема формування ризику від зовнішньої небезпеки

Варто звернути увагу на існування кореляційної залежності «рівень розвитку економічної системи – ймовірність ризику впливу на соціальне середовище – ризик здоров'ю людини». Це загальний зв'язок, що відбиває цілий комплекс параметрів, які визначають величину екологічного здоров'я навколишнього середовища і ризик здоров'ю людини зокрема. У цьому випадку визначення ризику здоров'ю населення подається у вигляді схеми, у склад якої включено підсистеми КЕС (рис. 2).

Виходячи з положення, що ризик зниження рівня санітарно-екологічної безпеки (СЕБ) є ймовірністю негативних змін стану здоров'я населення або його майбутніх поколінь, порушень сприятливих умов життєдіяльності лю-

дини (включаючи погіршення умов і якості життя, виникнення дискомфортних станів та ін.), обумовлених впливом факторів середовища перебування [5], *відвернений ризик СЕБ* розглядається як імовірність реалізації сприятливих умов життєдіяльності людини й (або) стану здоров'я майбутніх поколінь у результаті зниження негативного впливу факторів навколишнього середовища. Це поняття є комплексною характеристикою і містить у собі не тільки власно відвернений ризик здоров'ю, але й інші види ризиків, безпосередньо не пов'язаних зі змінами здоров'я людини. Так, існує ризик зниження якості життя внаслідок зменшення особистої безпеки, доступності й якості медичної допомоги, освіти, комфортності житла й побуту тощо.

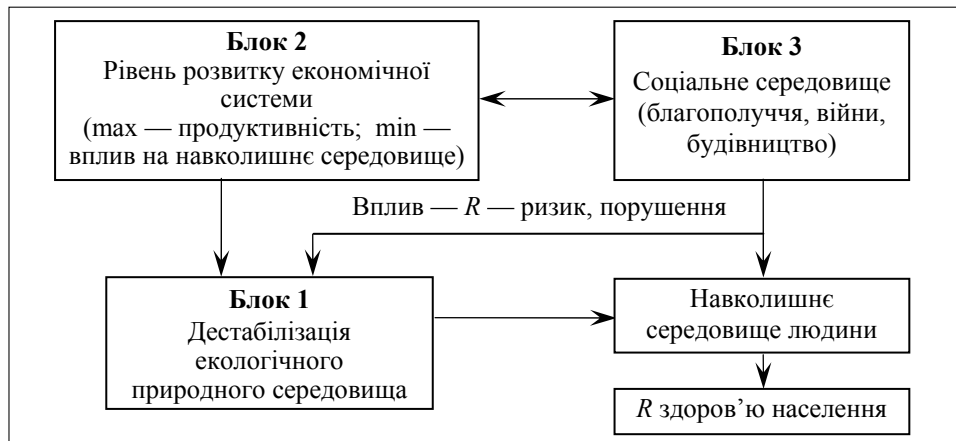


Рис. 2. Фактори формування рівня ризику для здоров'я людини

Вибір показників СЕБ оснований на характеристиці компоненти здоров'я, залежної від впливів середовища перебування. Згідно із корпоративним підходом відповідно до концепції КЕС групування аналізованих показників розподіляють по трьох факторних блоках: біологічні, хімічні, фізичні параметри стану екологічного природного середовища — екологічна оцінка (блок 1); викиди, скиди, утворення відходів відповідно до продуктивності економічної системи — оцінка впливу (блок 2); спосіб життя й соціально-економічне середовище перебування людини — оцінка здоров'я (медичний аспект) (блок 3) (рис. 2).

Такі роботи проведено у напрямку визначення санітарно-епідеміологічного благополуччя. Вони передбачають ранжування показників із урахуванням вектора спрямованості їх впливу на здоров'я, оскільки у кожному блоці багатовимірної системи під час встановлення ризику здоров'ю аналізується велика кількість показників: блок 1 (А) — 33 показники; блок 2 (Б) — 29 показників; блок 3 (В) — 12 показників [6, 7]. Більшому показнику надається менше значення рангового місця у випадку, якщо показник негативно впливає на здоров'я й потрібне зниження його значення (негативний вектор спрямованості). Більшому показнику відповідає більше значення рангового місця, якщо показник позитивно впливає на здоров'я (позитивний вектор спрямованості).

Для територій дослідження проводять підсумовування рангових балів за всіма показниками кожного блоку. По кожному факторному блоку для окремої території розраховується значення нормованого показника (НП) [8].

За нормований показник ( $P_{\text{фон}}$ ) прийнято зважене арифметичне середнє суми балів по кожному блоку, що враховує частоти ознак із негативним і позитивним векторами спрямованості показників:

$$\text{НП}_i = \sum P_i (P_{\text{фон}})^{-1}, \quad P_{\text{фон}} = \left( \sum P_i^- f_i^- + \sum P_i^+ f_i^+ \right) \left( \sum f_i^- + \sum f_i^+ \right)^{-1}, \quad (1)$$

де  $P_i$  — сума балів за всіма показниками кожного блоку для окремої території, розрахована додаванням результатів ранжування показників при негативному ( $P_i^-$ ) і позитивному ( $P_i^+$ ) векторах спрямованості впливу їх на здоров'я;  $f_i^-$  — відносні частоти груп показників, які ранжуювані при негативній й позитивній ( $f_i^+$ ) спрямованості векторів їх впливу на здоров'я.

Значення  $\text{НП}_i$  приводять до ймовірнісних величин відповідно до моделі [7]:

$$P_{\text{risk}_i} = 1 - \exp[0,5(-\text{НП}_i^2)], \quad (2)$$

де  $P_{\text{risk}_i}$  — ймовірнісна величина, яка характеризує рівень запобігання ризику ізольованого впливу групи показників відповідних блоків ( $n_j$ ).

Інтегрований показник відверненого ризику СЕБ на територіях області дослідження розраховується підсумовуванням величин ізольованого відверненого ризику по кожному з факторних блоків  $n_j$  з урахуванням їх вагового впливу ( $w$ ) [9]. Зважаючи на існуючий зв'язок у КЕС і відповідно можливий вплив показників блоку 1 на показники, що формують блоки 2 і 3, використано підсумкову модель розрахунку відверненого ризику СЕБ за правилами додавання ймовірностей набуває вигляду:

$$\text{СЕБ}_i = w_{3_i} P_{\text{risk}_{3_i}} + w_{2_i} P_{\text{risk}_{2_i}} + P_{\text{risk}_{1_i}} (w_{1_i} - w_{1/2} P_{\text{risk}_{2_i}} - w_{1/3} P_{\text{risk}_{3_i}}) \quad (3)$$

Вплив групи факторів на підсумкову величину подають лінійною залежністю, а їх вагове значення — моделлю такого вигляду:

$$Y = a_0 + a_j X_j, \quad w_y(w_{ji}) = (a_y P_{\text{risk}_y}) (a_0 + a_y P_{\text{risk}_y})^{-1}, \quad (4)$$

де  $X_j$  — середнє значення  $P_{\text{risk}_i}$  по блокам;  $Y$  — середнє значення результуючого показника за підсумковою сумою балів блоків 1 (А), 2 (Б), 3 (В);  $a_j$  — коефіцієнт лінійної регресії по блоках.

Розрахунок часткового внеску кожного з факторних блоків у загальну структуру СЕБ для конкретних територій регіону здійснюють за формулою

$$DU_y = 100[(w_{ji} \cdot P_{\text{risk}_{ji}})(\text{СЕБ}_i)^{-1}],$$

де  $DU_y$  — частка факторного блоку для адміністративної території  $y$ , %.

Для визначення екологічного ризику формування небезпечних умов середовища і прогнозу його величини доцільно використовувати розрахунки відносного ризику  $RR_{\text{від}}$ , значення  $\delta RR_t$ , пов'язаного з дією забруднення чи

інших  $t$ -факторів, величину  $\delta AR$  — приріст/зниження атрибутивного ризику під час зміни  $RR$  відповідно до моделей

$$RR_{\text{від}} = \frac{RR}{1 + 0,01 R_{\text{забр}} \cdot RR}; \quad \delta RR_t = \frac{0,01 AR_t RR^2}{1 + 0,01 AR_t RR}; \quad \delta AR = \frac{RR_1 - RR_2}{RR_1 \cdot RR_2} \quad (5)$$

де 0,01 — коефіцієнт переведення відсотків у частки від одиниці.

Дія будь-яких факторів враховується завдяки розрахункам відносних ризиків:

- ризик від забруднення ( $\delta RR_{\text{забр}}$ ):

$$\delta RR_{\text{забр}} = \frac{0,01 AR_{\text{забр}} RR^2}{1 + 0,01 AR_{\text{забр}} RR}; \quad (6)$$

- ризик від профілактичних заходів із підвищення опірності ( $\delta RR_{\text{заход}}$ ):

$$\delta RR_{\text{заход}} = \frac{0,01 AR_{\text{заход}} (RR - \delta RR_{\text{забр}})^2}{1 + 0,01 AR_{\text{заход}} (RR - \delta RR_{\text{забр}})}; \quad (7)$$

- ризик від неврахованих факторів ( $\delta RR_{\text{неврах}}$ ):

$$\delta RR_{\text{неврах}} = \frac{0,01 AR_{\text{неврах}} (RR - \delta RR_{\text{забр}} - \delta RR_{\text{заход}})^2}{1 + 0,01 AR_{\text{неврах}} (RR - \delta RR_{\text{забр}} - \delta RR_{\text{заход}})}. \quad (8)$$

Величину  $AR_{\text{забр}}$  запропоновано визначати шляхом перемноження концентрації речовини на процент приросту захворюваності на одиницю концентрації речовини чи у вигляді відношення величини очікуваного ризику до реального за спостереженнями [10]. Різниця між відсотком приросту захворюваності на одиницю концентрації забруднювачів і коефіцієнтом атрибутивного ризику від забруднення становить величину відносного ризику.

Оскільки для КЕС інтегральний ризик визначається на основі трьох складових, то оцінка сумісного екологічного й економічного ризику позначається як узагальнений ризик (рис. 3). Використання методу згортки дозволяє визначити загальну оцінку економічного і екологічного ризику, який контролюється зміною матеріальних потоків, тобто позначається матеріальним ризиком. Узагальнення матеріального та соціального ризиків дозволяє одержати інтегральний ризик від дії негативних факторів як внутрішнього, так і зовнішнього походження, які спричиняють порушення у складових КЕС і в ній в цілому.

Перша матриця дає узагальнену оцінку економічного й екологічного ризику — матеріальний ризик. Друга матриця дає узагальнену оцінку локальним ризикам людських втрат і погіршення умов життя, тобто оцінку соціальному ризику. Третя матриця дає оцінку інтегральному ризику шляхом агрегування узагальнених оцінок матеріального й соціального ризиків (рис. 3). Логічні матриці згортки визначають процедуру агрегування локальних ризиків в інтегральну оцінку ризику, і тим самим фіксують пріоритети й політику управління об'єктом відповідно до зафіксованих ефектів,



збитків різного типу. Твердження логічних матриць згортки — відповідальна процедура, яка визначає прийняття управлінського рішення.

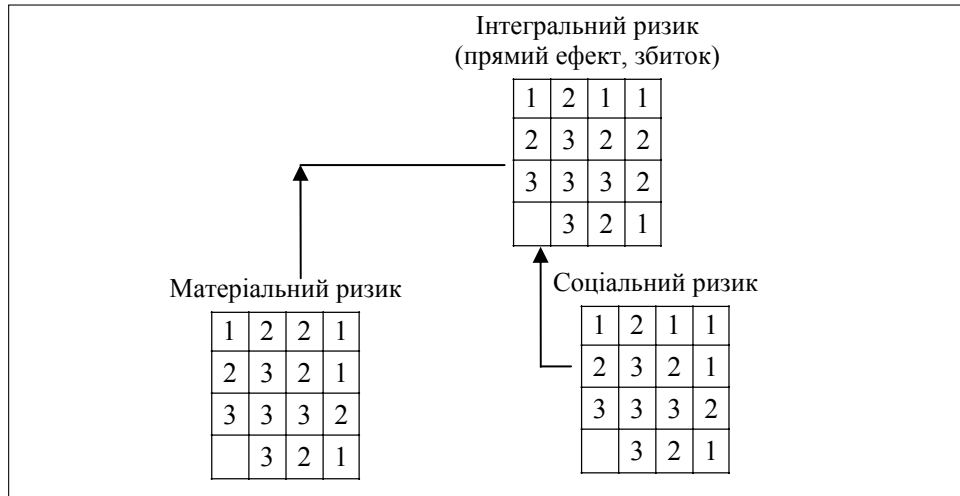


Рис. 3. Логічна матриця згортки для визначення інтегрального ризику

Описана методика побудови інтегральної оцінки ризику на основі агрегування локальних ризиків (очікуваних збитків) може бути без істотних змін застосована й для побудови інтегральної оцінки ризику як математичного очікування інтегральної оцінки збитку. Для цього досить вихідні показники розглядати не як локальні ризики, а безпосередньо збитки, приписуючи кожній величині збитку відповідну ймовірність. Таким чином, кожний тип збитку характеризується розподілом ймовірностей значень збитку. Завдання полягає у визначенні на основі цих даних розподілу ймовірностей можливих значень інтегральної оцінки збитку [11]. Якщо  $p_{ij}$  — ймовірність значення  $j$  для збитку  $a_i$ ,  $i = \overline{1,4}$ ;  $j = \overline{1,3}$ , то значення ймовірностей  $p_{ij}$  відповідають табл. 1:

Із аналізу матриці матеріального ризику (рис. 3) встановлено, що незначний матеріальний збиток (оцінка 1) має місце у двох випадках. У першому випадку незначним є економічний і екологічний збиток, а в другому — при незначному екологічному збитку має місце відчутний економічний збиток. Якщо  $q_{1j}$  — ймовірність оцінки  $j$  матеріального збитку, то відповідно до відомих формул теорії ймовірностей одержуємо:

**Таблиця 1.** Значення ймовірності збитків

0,3	0,3	0,4
0,3	0,3	0,4
0,4	0,3	0,3
0,4	0,3	0,3

$$q_{11} = p_{11} \cdot p_{21} + p_{12} \cdot p_{21};$$

$$q_{12} = p_{11} \cdot p_{22} + p_{11} \cdot p_{23} + p_{12} \cdot p_{22} + p_{13} \cdot p_{21};$$

$$q_{13} = p_{12} \cdot p_{23} + p_{13} \cdot p_{22} + p_{13} \cdot p_{23};$$

де  $q_{11}$  — незначний матеріальний збиток;  $q_{12}$  — відчутний матеріальний збиток;  $q_{13}$  — істотний матеріальний збиток. Таким чином визначається розподіл ймовірностей значень соціального збитку  $q_{2j}$ :

$$q_{21} = p_{31} \cdot p_{41} + p_{32} \cdot p_{41} + p_{31} \cdot p_{42} + p_{32} \cdot p_{42};$$

$$q_{22} = p_{31} \cdot p_{43} + p_{33} \cdot p_{41};$$

$$q_{23} = p_{32} \cdot p_{43} + p_{33} \cdot p_{42} + p_{33} \cdot p_{43}.$$

Знаючи розподіли матеріального і соціального ризиків на основі матриці інтегрального ризику, визначається розподіл імовірностей значень інтегрального збитку  $Q_j$ :

$$\begin{aligned} Q_1 &= q_{11}(q_{21} + q_{22}); \\ Q_2 &= q_{11} \cdot q_{23} + q_{12} \cdot q_{22} + q_{12} \cdot q_{21}; \\ Q_3 &= q_{12} \cdot q_{23} + q_{13} \cdot q_{23} + q_{13} \cdot q_{22} + q_{13} \cdot q_{21}. \end{aligned} \quad (9)$$

Припущення про незалежність ризиків різних типів не завжди відповідає дійсності. У низці випадків більш адекватним є сценарний підхід, при якому надзвичайна ситуація має кілька варіантів (сценаріїв) розвитку. Кожний із варіантів реалізується з деякою ймовірністю й характеризується певним вектором збитків. У цьому випадку збитки різних типів не є незалежними випадковими величинами. Якщо число можливих сценаріїв дорівнює  $m$ , а ймовірність  $j$ -го варіанта дорівнює  $P_j$ , то для кожного варіанта  $j$  визначається інтегральна оцінка збитку  $Q_j$ . Знаючи інтегральні оцінки збитку кожного варіанта і його ймовірність, можна визначити ризик:

$$R = \sum_{j=1}^m Q_j \cdot P_j, \quad (10)$$

де  $m$  — число можливих значень оцінок інтегрального збитку.

Усі види ризиків, що пов'язані з наслідками прояву негативного фактора і визначених порушень в окремих підсистемах КЕС, кількісно встановлюються на основі прямих і непрямих втрат, які несе національна економіка та населення країни в результаті надзвичайних ситуацій, розділяють на три основні групи: економічні, соціальні (загибель людей, втрата здоров'я, погіршення умов життя), екологічні (рис. 4).

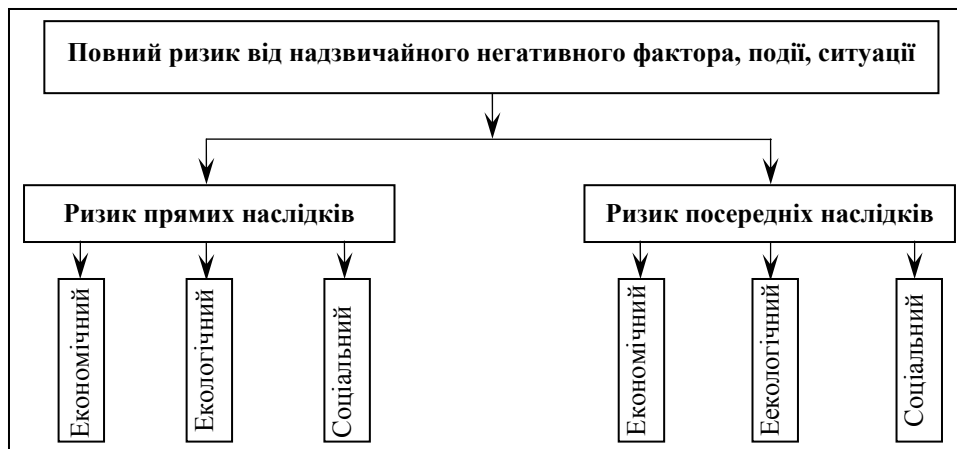


Рис. 4. Схема визначення повного ризику в умовах КЕС

Таким чином, показник повного ризику, який є кінцевим на конкретний момент часу, є проміжним у порівнянні з деяким остаточним показником, що визначиться кількісно у віддаленій перспективі. Останній називається загальним ризиком і за ним у кількісній оцінці визначається сума всіх втрат, збитків і витрат з урахуванням зіставлення до аварійного розвитку як уражених виробництв і місцевостей, так і всього господарства територій в цілому.

Значення поняття ризику для концепції КЕС виявляється через сприйняття його як відображення наслідків особливого виду діяльності, пов'язаного з подоланням невизначеності в ситуації неминучого вибору, у процесі якого є можливість кількісно і якісно оцінити ймовірність досягнення передбачуваного результату, невдачі та відхилення від мети. Різниця між ризиком і невизначеністю належить до способу завдання інформації й визначається наявністю (у випадку ризику) або відсутністю (при невизначеності) імовірнісних характеристик неконтрольованих змінних. У такому змісті ці терміни подано в математичній теорії дослідження операцій, як задачі прийняття рішень в умовах ризику і невизначеності.

Якщо існує можливість якісно й кількісно визначити ступінь імовірності того чи іншого варіанта, то це й буде ситуація ризику. Остання — це різновид невизначеності, коли настання подій імовірно і може бути визначено, тобто об'єктивно існує можливість оцінити ймовірність подій, які виникають у результаті діяльності, дії визначених факторів, наслідків процесів або явищ, впливу природного середовища на розвиток економіки, упровадження досягнень науки в народне господарство та ін.

Таким чином, ризик завжди пов'язано з вибором певних альтернатив і розрахунком імовірності їх результату — у цьому виявляється його суб'єктивна сторона.

Однак величина ризику не тільки суб'єктивна, але й об'єктивна характеристика, оскільки вона є формою якісно-кількісного вираження реально існуючої невизначеності.

Проблема прийняття управлінських рішень, забезпечення їх результативності пов'язана на практиці із реалізацією цільової функції КЕС — встановленням екологічної безпеки, що потребує впровадження низки основних принципів:

- **принцип інтегральної оцінки небезпеки:** управління ризиком включає весь сукупний спектр існуючих у суспільстві небезпек, вся інформація про прийняття рішення в цій області загальнодоступна;
- **принцип стійкості екосистем:** величина антропогенного впливу має строго обмежуватися й не перевищувати величин граничнодопустимих навантажень на екосистеми;
- **принцип пріоритету безпеки життя та здоров'я людей:** склад заходів для забезпечення безпеки населення у випадку виникнення і розвитку будь-якого ризику, спричинення надзвичайних ситуацій; визнання в умовах концепції КЕС на даний момент величини оцінки ризику здоров'ю ідентифікаційним параметром рівноважного стану КЕС, який відповідає вимогам екологічності і гармонії в системі «людина–природа (навколишнє середовище)» (рис. 5).

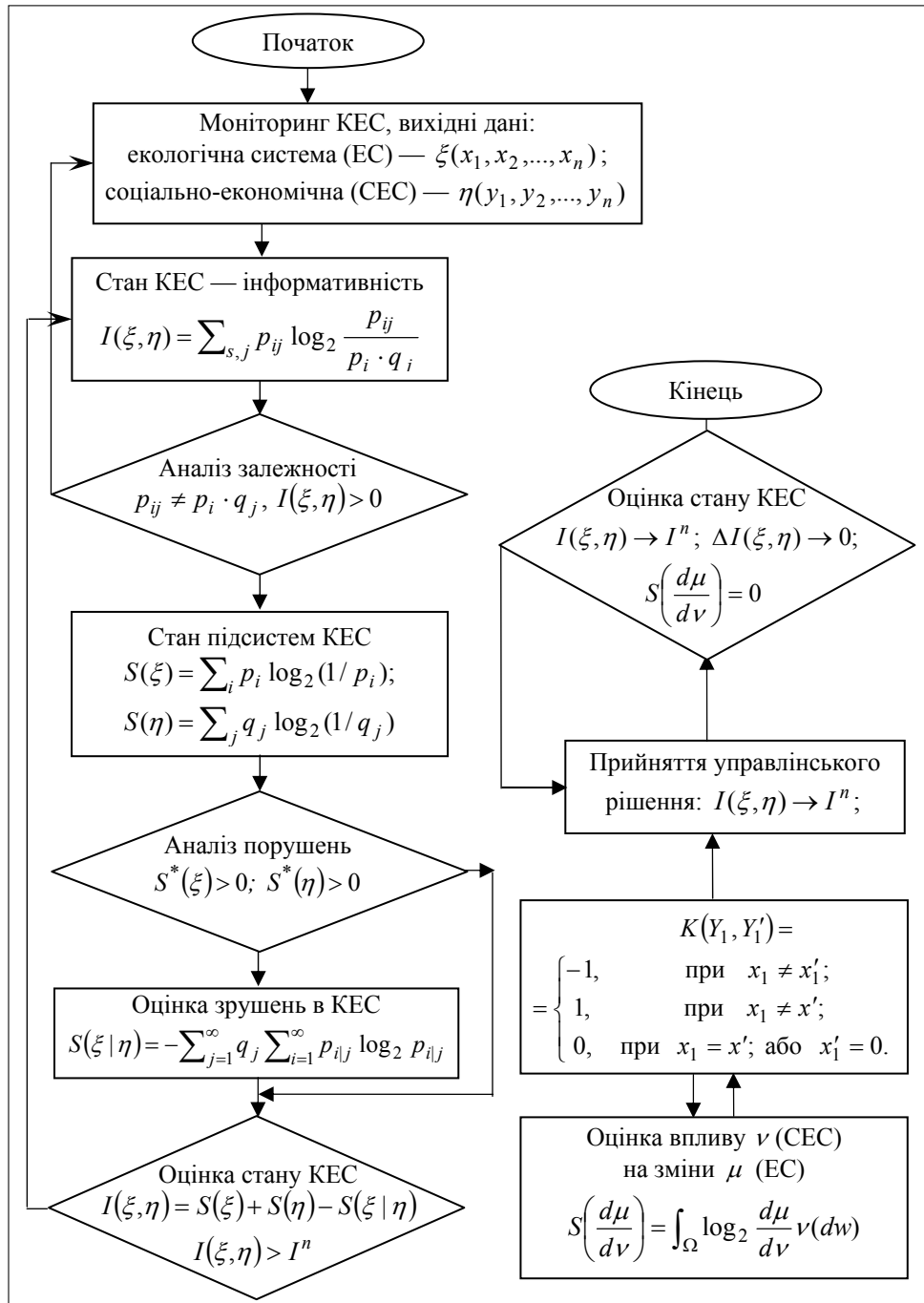


Рис 5. Схема алгоритма оцінки стану КЕС на основі ентропійного підходу і компараторної ідентифікації, де  $\xi$  — випадкова величина, яка набуває значення  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  з імовірністю  $(p_1, p_2, \dots, p_n)$ ;  $\eta$  — випадкова величина, яка набуває значення  $(y_1, y_2, \dots, y_m)$  з імовірністю  $(q_1, q_2, \dots, q_m)$ ;  $p_{ij}$  — імовірність сполучення подій  $\xi = x_i$ ;  $\eta = y_j$ ;  $S$  — ентропія стану систем;  $\mu$  — екологічні зрушення від мір  $\nu$  антропогенних (відповідно до Радона-Никодима) ( $S_t w = w(t + \tau)$ );  $I^n$  — початковий рівноважний стан; \* — визначення  $S$  за умови  $I^n = 0$

## **ВИСНОВКИ**

Таким чином, розвиток концепції корпоративної екологічної системи і прийняття управлінського екологічного рішення безпосередньо пов'язано з впровадженням і подальшим розвитком теорії ризику (рівняння 3, 6, 7, 8), а саме, екологічного ризику, і формуванням цілісної теорії екологічного управління, спрямованої на гармонізацію розвитку трьох систем і забезпечення екологічності на основі рівноваги в КЕС (рис. 5).

Загальний ризик від дії небезпечного фактора визначається виникненням безпосередньо порушень у підсистемах КЕС і ймовірністю прояву негативних наслідків протягом тривалого часу (рівняння 9, 10).

## **ЛІТЕРАТУРА**

1. *Современные проблемы экологической гигиены* / Под ред. М.П. Захарченко. — Киев: Хрещатик, 1993. — Ч. 1 — 174 с.; Ч. 2 — 153 с.
2. *Козуля Т.В.* Теоретичні аспекти створення корпоративної системи екологічного управління // *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. — 2005. — № 2 (10). — С. 193–197.
3. *Меньшиков В.В.* Концептуальные основы оценки экологического риска. — М.: Изд-во МНЭПУ, 2001. — 44 с.
4. *Гігієна та екологія* / Під ред. члена-кореспондента АМН України, проф. В.Г. Бардов. — Київ: НМУ ім. О.О. Богомольця, 2006. — 720 с.
5. *Новиков С.М., Шашина Т.А., Абалкіна І.Л., Скворцова І.С.* Риск воздействия химического загрязнения окружающей среды на здоровье населения: от оценки к практическим действиям. — М.: Медицина, 2003. — 83 с.
6. *Проблемы оценки риска здоровью населения от воздействия факторов окружающей среды* / Под ред. Ю.А. Рахманина, Г.Г. Онищенко. — М.: НИИ ЭЧ и ГОС, 2004. — С. 157–160.
7. *Комплексная гигиеническая оценка степени напряженности медико-экологической ситуации различных территорий, обусловленной загрязнением токсикантами среды обитания населения. Методические рекомендации: рекомендации; введены в действие с 30.06.97, № 2510/5716-97-32.* — М., 1997. — 23 с.
8. *Петров А.Н., Жиляков А.М., Дружинин М.В.* Оценка риска здоровью при определении санэпидблагополучия населения // *Гигиена и санитария*. — 2006. — № 5. — С. 49–50.
9. *Шиган Е.Н.* Методы прогнозирования и моделирования в социально-гигиенических исследованиях. — М.: Медицина, 1986. — 208 с.
10. *Вентцель Е.Н.* Теория вероятностей. — М.: Высш. шк., 2001. — 575 с.
11. *Бурков В.Н., Щепкин А.В.* Экологическая безопасность. — М.: ИПУ РАН, 2003. — 92 с.
12. *Козуля Т.В., Шаронова Н.В.* Моделирование структуры и идентификация состояния корпоративной экологической системы (КЭС) // *Проблеми інформаційних технологій*. — 2007. — № 1. — С. 178–185.

*Надійшла 18.03.2009*

## **ПРИОРИТЕЗАЦИЯ ТЕСТОВ КАК МЕТОД БЫСТРОГО ВЫЯВЛЕНИЯ СЕРЬЕЗНЫХ ОШИБОК**

**А.Г. МАЛЫШЕВСКИЙ**

Рассмотрено использование информации о стоимости тестов и серьезности ошибок в процессе приоритизации в регрессивном тестировании. Описаны способы оценки стоимости тестов и серьезности ошибок. Рассмотрена серьезность ошибок с точки зрения надежности программы. Исследованы три метода внедрения информации о стоимости и критичности тестов в процесс приоритизации. Исследовано влияние шкалы стоимости тестов и серьезности ошибок на эффективность методов приоритизации.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Одним из методов проверки, удовлетворяет ли программа заданным требованиям и ее спецификации, является тестирование (выполнение программы и проверка ее поведения на соответствие спецификациям). Каждый тест из набора тестов  $T$ , используемого в тестировании, состоит из множества входных данных (сценариев тестирования), состояния системы до получения этих входных данных и ожидаемое состояние системы вместе с выходными данными. Обычно набор тестов создается, исходя из некоторого множества правил, называемого критерием адекватности. Данный критерий выражает условия, которым должен удовлетворять набор тестов [1]. На стадии сопровождения программы многократно используется регрессивное тестирование, которое показывает, что внесенные в программу модификации не только изменили программу в соответствии с новыми спецификациями и исправили найденные ошибки, но и не внесли новых ошибок [1].

В регрессивном тестировании растет набор тестов, увеличивая стоимость и продолжительность тестирования. Например, одна из систем ПО из 20 000 строк кода требует семь недель для тестирования при использовании всех тестов в наборе. Во многих случаях в процессе регрессивного тестирования можно использовать только подмножество набора тестов для проверки модифицированной программы. Но иногда бывает сложно использовать или совсем не допускается использование неполного набора тестов, например, для программ, надежность которых является критичной (авионика или управление медицинским оборудованием). В данном случае для уменьшения стоимости регрессивного тестирования может быть применен иной подход: тесты упорядочиваются (приоритизируются) для регрессивного тестирования таким образом, чтобы более важные из них выполнялись в первую очередь.

Вопросам приоритезации уделено много внимания [2–22]. В методах приоритезации тесты сортируют таким образом, чтобы эффективнее достичь заданной цели, например, наиболее быстрого покрытия операторов программного кода, функций программы в порядке частоты их использования или подсистем в порядке частоты их сбоев в прошлом. Возможная цель приоритезации — увеличение скорости выявления ошибок набором тестов в процессе тестирования. Возросшая скорость выявления ошибок может обеспечить более раннюю обратную связь с регрессивно тестируемой системой и позволить разработчикам начать поиск местонахождения ошибок, а также их исправление раньше, чем это было бы возможно в ином случае. Такая обратная связь обеспечивает выявление ранних признаков того, что заданные цели еще не достигнуты, и позволяет принимать стратегические решения о сроках релиза на ранних этапах. Повышенная скорость обнаружения ошибок увеличивает вероятность того, что в случае преждевременного прекращения процесса тестирования тесты, обеспечивающие наибольшую способность выявлять ошибки в сроки, выделенные на тестирование, уже были выполнены.

В работах [4, 5, 7, 10, 13, 20] была представлена метрика *APFD* (weighted average of the percentage of faults detected — взвешенное среднее процента выявленных ошибок) для измерения скорости выявления ошибок во время выполнения набора тестов в заданном порядке. В этих работах представлены несколько методов приоритезации, целью которых являлось увеличение скорости выявления ошибок, а также была эмпирически оценена их эффективность. Результаты показали, что некоторые методы приоритезации (например, приоритезация по дополнительному покрытию операторов) могут ускорить выявление ошибок.

На практике, как стоимость тестов, так и серьезность ошибок могут значительно отличаться между собой. Поэтому, в последующих работах [6, 9, 21, 22] была рассмотрена приоритезация учитывающая стоимость тестов и серьезность ошибок. Также была разработана метрика *APFD<sub>C</sub>* учитывающая их, и было проиллюстрировано применение приоритезации.

**Цель работы** — исследование альтернативного подхода и внедрению информации о серьезности потенциальных ошибок в процесс приоритезации используя реальную информацию о стоимости тестов и серьезности ошибок.

В данной работе, мы расширим исследования представленные в [6, 9, 21, 22] следующим образом. Мы более детально рассмотрим применение приоритезации учитывающей стоимости тестов и серьезности ошибок, рассмотрим серьезность ошибок с точки зрения их влияния на надежность программы (в предшествующих исследованиях, мы рассматривали серьезность как последствия индивидуальных сбоев программы вызванных данной ошибкой), рассмотрим альтернативный подход к внедрению информации о серьезности потенциальных ошибок в процесс приоритезации, рассмотрим большее, нежели в предыдущих работах количество методов приоритезации, используем реальную, вместо искусственно сгенерированной, информацию о стоимости тестов и серьезности ошибок, рассмотрим их различные шкалы, а также проведем расширенные исследования, в которых используем большее количество программ-объектов исследования.

Научная новизна данной работы состоит в разработке и изучении нового подхода внедрения стоимости тестов и серьезности ошибок в процесс приоритезации.

**МЕТРИКИ APFD И APFD<sub>C</sub>**

Для анализа эффективности приоритизации необходимо оценить ее количественно.

В ранних исследованиях [4, 5, 7, 10, 13, 20] использовалась метрика APFD, оценивающая скорость выявления ошибок набором тестов в интервале от 0 до 100. Чем больше значение метрики, тем быстрее выявляются ошибки. Метрика APFD проиллюстрирована на рис. 1. Кривая на графике отмечает выявленные в процессе тестирования ошибки. Численное значение метрики — выраженная в процентах площадь под кривой (отмечена серым цветом) относительно площади всего прямоугольника. Рис. 1,а содержит таблицу показывающую какие ошибки (от 1 до 10) выявляет каждый тест (А, В, С, D или E). Четыре части рисунка (б, в, г, д) графически отображают метрику для четырех различных порядков тестов.

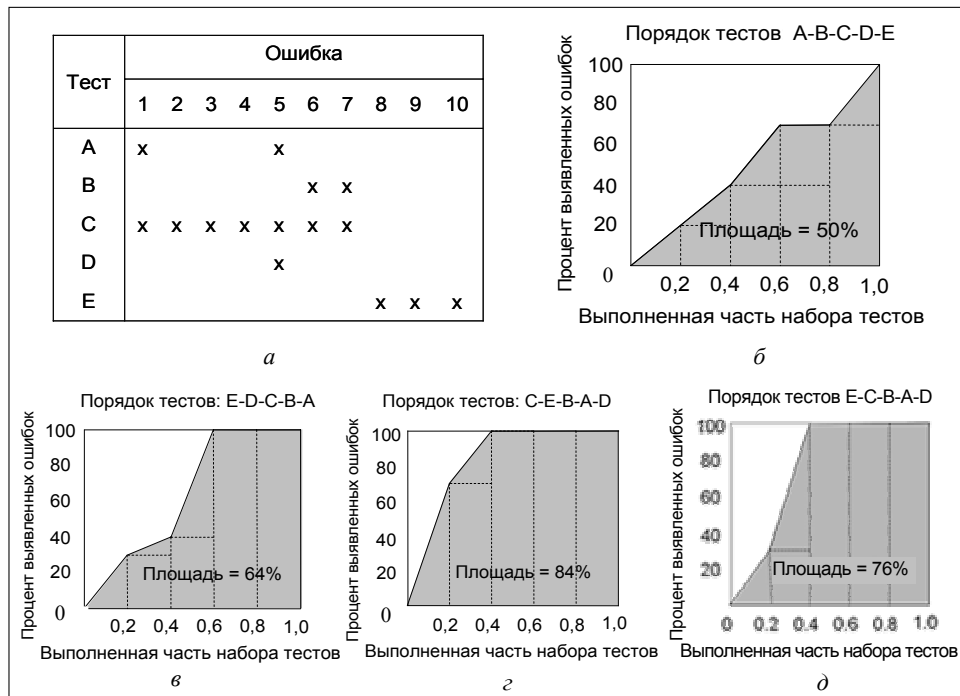


Рис. 1. Примеры, иллюстрирующие метрику APFD: а — тесты и выявленные ими ошибки; б — APFD для приоритизированного набора тестов Т1; в — для Т2; г — для Т3; д — для Т4

Однако данная метрика основывается на двух допущениях: 1) все ошибки идентичны по серьезности; 2) все тесты идентичны по стоимости. Эти допущения выражаются в том, что данная метрика просто определяет процент выявленных ошибок для выполненной части набора тестов. Поэтому в более поздних работах [6, 9, 21, 22], где учитывалась как стоимость тестов так и серьезность ошибок, была разработана и использована метрика APFD<sub>C</sub>. Эта метрика используется и в данной работе. В метрике APFD<sub>C</sub>, на графике, на горизонтальной оси отображается «Процент суммарной затраченной стоимости тестов». Здесь, каждый тест в наборе представлен интервалом вдоль горизонтальной оси, чья длина пропорциональна доли стои-



мости данного теста в суммарной стоимости тестов в наборе. На вертикальной оси графика, отображается «Процент суммарной серьезности выявленных ошибок». Теперь, каждая ошибка выявленная набором тестов представлена интервалом вдоль вертикальной оси, чья высота пропорциональна доли ее серьезности в общей сумме серьезности ошибок. В свете этой новой интерпретации, на графиках, вклад теста взвешивается в горизонтальном направлении по его стоимости, и вдоль вертикального направления по суммарной серьезности выявленных им ошибок. В таких графиках, кривая ограничивает большую площадь для порядка тестов который демонстрирует больше «единиц серьезности ошибок выявленных на единицу стоимости теста». Эта площадь и составляет метрику  $APFD_C$ .

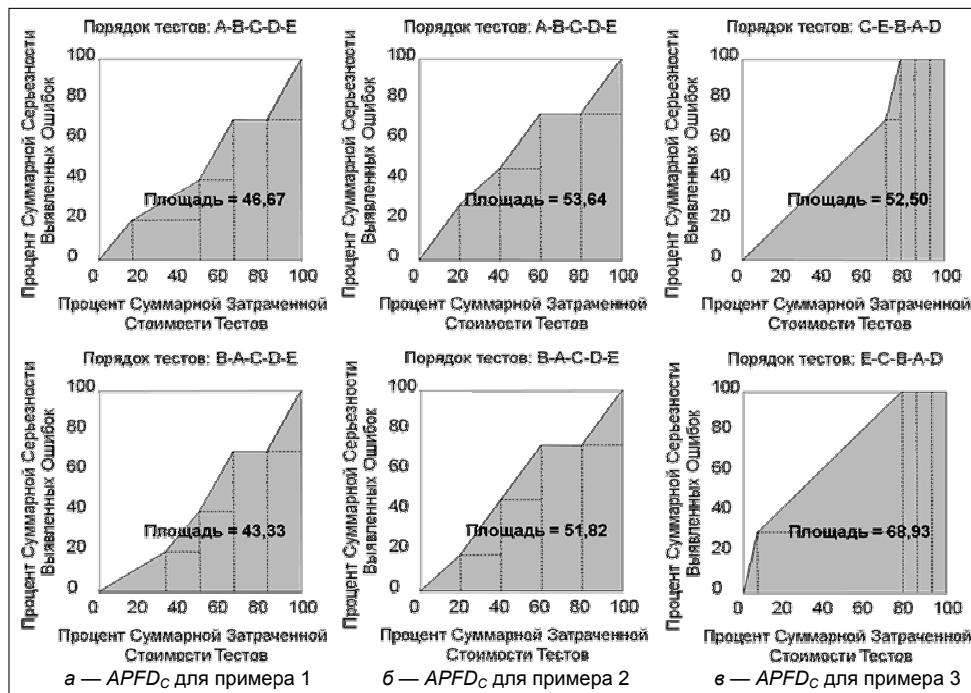


Рис. 2. Примеры, иллюстрирующие метрику  $APFD_C$

Для иллюстрации метрики  $APFD_C$  графически, рис. 2 показывает графики для трех примеров. Информация о выявлении ошибок тестами взята из рис. 1, а.

**Пример 1.** Рассмотрим сценарий, показанный на рис. 1. Допустим, что стоимость теста В в два раза превосходит стоимость теста А, требующего два часа машинного времени, тогда как тест А — один час. С точки зрения ошибок, выявленных за час, порядок тестов А–В–С–Д–Е предпочтительней порядка В–А–С–Д–Е, который выявляет ошибки быстрее. Пара графиков расположенная слева (рис. 1, а) соответствует примеру 1: верхний график представляет метрику  $APFD_C$  для порядка тестов А–В–С–Д–Е, а нижний график — метрику  $APFD_C$  для порядка В–А–С–Д–Е. Метрика  $APFD_C$  дает предпочтение порядку А–В–С–Д–Е, который быстрее выявляет ошибки.

**Пример 2.** Работая опять со сценарием, показанным на рис. 1, предположим, что все пять тестов имеют равную стоимость и что ошибки 2...10 имеют значение серьезности, равное  $k$ , тогда как ошибка 1 имеет серьез-

ность  $2k$ . В данном случае тест А выявляет одну более серьезную ошибку и одну менее серьезную, тогда как тест В — только две менее серьезные ошибки. С точки зрения скорости выявления суммарной серьезности ошибок порядок тестов А–В–С–D–Е предпочтительней порядка В–А–С–D–Е. Пара графиков на рис. 1,б, соответствующая примеру 2, показывает как метрика  $APFD_C$  дает более высокую оценку порядку тестов, который раньше выявляет более серьезную ошибку (А–В–С–D–Е) при допущении, что ошибкам 2–10 присвоено значение серьезности  $k$  и ошибке 1 присвоено значение серьезности  $2k$ .

**Пример 3.** Предположим, что все десять ошибок равнозначны по серьезности и, что каждый из тестов А, В, D и Е требует один час для выполнения, а тест С — десять часов. Однако с точки зрения ошибок, выявленных за единицу времени, второй порядок (Е–С–В–А–D) предпочтительнее: он выявляет три ошибки в течение первого часа и остается лучшим, чем первый порядок, до конца выполнения второго теста. Аналогичный пример может быть приведен для использования ошибки с неравной серьезностью при равной стоимости тестов. Пара графиков на рис. 1,в, соответствующие примеру 3, показывает как метрика различает порядки тестов, где тест С имеет высокую стоимость: для порядка Е–С–В–А–D, метрика присваивает ему большее значение, чем порядку С–Е–В–А–D.

Пусть  $T$  будет набором содержащим  $n$  тестов со стоимостями  $t_1, t_2, \dots, t_n$ ;  $F$  — множеством  $m$  ошибок выявленных набором тестов  $T$ ; и  $f_1, f_2, \dots, f_m$  — значениями серьезности этих ошибок. Пусть  $TF_i$  будет первым тестом в порядке  $T'$  набора  $T$ , который выявляет ошибку  $i$ . Тогда формула для метрики  $APFD_C$  имеет следующий вид:

$$APFD_C = \frac{\sum_{i=1}^m \left( f_i \times \left( \sum_{j=TF_i}^n t_j - \frac{1}{2} t_{TF_i} \right) \right)}{\sum_{i=1}^n t_i \times \sum_{i=1}^m f_i}.$$

### СТОИМОСТЬ ТЕСТОВ

Стоимость теста — это количество ресурсов (например, денег или времени) затраченных на его выполнение (не включает в себя затраты на его разработку). Существует два вопроса связанных со стоимостью тестов: первый — измерение или оценка стоимости с целью вычисления значения метрики  $APFD_C$  для порядка тестов и второй — оценка стоимости для использования в приоритизации тестов. Стоимость теста связана с ресурсами затраченными на выполнение данного теста и проверку результатов. Стоимость теста может измерять фактическое время затраченное на тестирование программы заданным тестом. Кроме того, стоимость может включать денежные затраты на выполнение теста и проверку результатов, включая стоимость оборудования, зарплату, стоимость материалов требующихся для тестирования, потери дохода связанные с задержкой выпуска ПО, потери связанные со срывом сроков релиза и т.д.

Определить стоимость тестов после завершения тестирования несложно, что и необходимо сделать для вычисления метрики  $APFD_C$ . В данном случае, нам необходимо обратить внимание на то, какие ресурсы были затрачены на каждый тест. Гораздо сложнее оценить стоимость тестов перед началом тестирования, что необходимо для использования стоимости в процессе приоритезации. В данном случае, нам необходимо предугадать стоимость тестов. Одним способом является анализ теста и программного кода выполненного тестом. Другим способом, который мы используем в данной работе является использование собранных данных о стоимости тестов на предыдущих сессиях тестирования (что представляется возможным при регрессивном тестировании). Здесь, мы полагаем, что стоимость тестов не меняется значительно от одной версии программы к другой.

В наших экспериментах для регрессивного тестирования требовалось лишь время выполнения каждого теста. Для сбора данных о времени их выполнения, все тесты, один за другим, были выполнены, и время выполнения и валидации результатов было измерено. То есть, в данной работе, стоимость теста — это время его выполнения в секундах.

## **СЕРЬЕЗНОСТЬ ОШИБОК**

Стоимость ошибки — это затраты или потери, выраженные в неких единицах (например деньгах), имеющие место, если ошибка осталась в релизе. Как и со стоимостью тестов, существует два вопроса связанных с серьезностью ошибок: первый — их измерение или оценка для вычисления метрики  $APFD_C$  для порядка тестов и второй — их оценка для использования информации при приоритезации тестов. Серьезность ошибки связана с затратами произошедшими, если ошибка осталась в программе после ее релиза. Возможны различные подходы для измерения такой серьезности, например:

1. Можно измерить серьезность ошибки как сумму денег потерянных в результате сбоя вызванного данной ошибкой (с учетом вероятности такого сбоя). Такой подход может применяться в ПО, где индивидуальные сбои могут привести к катастрофическим последствиям (например, судебные иски, человеческие жертвы, потеря оборудования).

2. Можно оценить последствия ошибки на надежность ПО. Данный подход применяется в ПО, где ошибки могут вызвать лишь неудобство для пользователей, и маловероятно, что сбой будет иметь серьезные последствия (например, текстовый редактор). В данном случае, основным последствием является снижение надежности ПО, которое может привести к потере клиентов.

В предыдущих работах [6, 9, 21, 22] использовался первый подход. В данной работе, мы рассмотрели и применили второй подход.

Подобно ситуации со стоимостью тестов, нас интересует как оценка серьезности ошибок до их обнаружения, так и оценка их серьезности после обнаружения. Когда тестирование закончено и уже есть информация об ошибках, можно оценить их серьезность для использования в метрике  $APFD_C$  (хотя это не так просто как со стоимостью тестов). С другой стороны, перед началом тестирования необходимо оценить серьезность потенциальных ошибок для использования данной информации в процессе приори-

тезации, а это намного сложнее, чем с оценкой стоимости тестов. Поэтому, необходимо связать тесты с серьезностью ошибок, которые они выявляют.

Если иметь информацию о том, какие ошибки выявляет каждый тест, и знать их серьезность, было бы несложно связать тесты с серьезностью ошибок. Но на практике, эта информация недоступна до завершения тестирования. Существуют два подхода для такой оценки.

1. Оценка критичности модулей. Здесь необходимо связать серьезность ошибки с критичностью модуля (или любого другого компонента программного кода), в котором данная ошибка может содержаться.

2. Оценка критичности тестов. Здесь необходимо связать тесты с серьезностью ошибок, которые они могут выявить.

Оценив критичность модулей или тестов, необходимо включить информацию о серьезности ошибок в процесс приоритизации. В данной работе, в исследованиях мы применим второй подход. Критичность тестов используется как метрика для оценивания серьезности ошибок, которые может выявить каждый тест. Так как на практике мы не можем знать об ошибках наперед, необходимо оценить критичность тестов не используя информацию об ошибках, которые данный тест может выявить. Полагаем, что серьезность ошибки определяется ее влиянием на надежность системы. Чем серьезнее ошибка, тем чаще происходят связанные с ней сбои. В данной работе мы не дифференцируем сбои, а учитываем лишь их частоту.

Для вычисления серьезности ошибок, нам необходимы понятия операции и операционного профиля.

### **Операции и операционный профиль**

Для понимания концепции *операционный профиль*, нам необходимо определить, что такое операция. Операцией является внешне-иницированное действие выполненное системой [23]. Операция может быть сравнена с функцией, внешне-иницированным действием, с точки зрения пользователей. Примерами операций могут быть команды, транзакции и обработка внешних событий.

*Операционный профиль* (operational profile) является множеством операций и вероятностью их использования [23]. Другими словами, дана система  $S$ , операционный профиль для  $S$  — список действий, которые пользователи могут делать с  $S$ , и частоту этих действий.

Рассмотрим пример текстового редактора. В этом примере, операция «изменить шрифт» может выполняться 20% времени, операция «вырезать текст» — 10%, «ввести текст» — 50%, «копировать текст» — 10% и «вставить текст» — 10%.

Операционный профиль часто используется при разработке систем ПО, включающим дизайн, разработку, тестирование и использование. Например, одним применением операционного профиля может быть тестирование операций пропорционально частоте их использования. Например, при тестировании текстового редактора приведенного в нашем примере, нам необходимо потратить половину усилий тестируя операцию «вставка текста».

В данной работе, мы использовали операционный профиль для оценки серьезности ошибок и критичности тестов. Для объектов исследования, сначала было определено множество операций применимых к программам, а затем операции были связаны с тестами. Это позволило создать матрицу

операций для программ, пары операции с тестами. Матрица операций используется для определения серьезности ошибок и критичности тестов описанным позднее методом.

Для использования серьезности ошибок в алгоритмах приоритезации необходимо ввести понятие критичности тестов.

### **Критичность тестов и ее вычисление**

Была определена критичность теста как его важность для пользователей программы. Критичность тестов может быть ассоциирована с частотой использования различных операций в системе. Тест выполняющий чаще используемые операции в программе более критичен, чем тест выполняющий реже используемые операции. Мы вычислили критичность каждого теста как сумму вероятностей использования различных операций выполненных тестом. То есть, критичность теста  $t_{crit} = \sum_{i=1}^n P_i$ , где  $n$  — количество операций выполненных тестом и  $P_i$  — вероятность использования  $i$ -й операции.

### **Вычисление серьезности ошибок**

В данной работе мы используем операционный профиль для оценки серьезности ошибок. Полагаем, что сбои в чаще используемых операциях ведут к более частым сбоям при нормальном использовании программы, и таким образом могут создавать более значительные проблемы пользователям. Поэтому, таким сбоям присваивается более высокая серьезность нежели сбоям связанным с редко используемыми операциями.

Для определения серьезности ошибок для наших объектов исследования, используется связь между матрицей ошибок (какие тесты выявляют какие ошибки) и матрице операций (какие тесты выполняют какие операции). Сначала определяем ассоциацию между ошибками и операциями. Эта связь определяется матрицей ошибок и матрицей операций.

Вернемся к примеру текстового редактора. Допустим в программе присутствуют три ошибки. Пусть ошибки 1 и 2 затрагивают операции «изменить шрифт», «вырезать текст», «ввести текст». Ошибка 3 затрагивает операции «копировать текст» и «вставить текст». В этом же примере, тесты 1, 2 и 3 выполняют операции «изменить шрифт», «вырезать текст» и «ввести текст», а тесты 4–8 выполняют операции «копировать текст» и «вставить текст». Кроме этого, ошибка 1 выявляется тестами 1, 2, 3, ошибка 2 выявляется тестом 1, а ошибка 3 выявляется тестами 4–8.

Таким образом, серьезностью ошибки может быть сумма вероятности использования операций затронутых ошибкой. Например, серьезность ошибки 1 — это сумма вероятности операций затронутых ошибкой 1, и равняется  $0,20 + 0,10 + 0,50 = 0,80$  (из описанного выше примера). Серьезность ошибки 2 равняется 0,80, а серьезность ошибки 3 равняется 0,20.

Такой подход дает ошибкам 1 и 2 равную серьезность. Ошибка 1 выявляется тестами 1, 2 и 3, но, с другой стороны, ошибка 2 выявляется только тестом 1. Если тесты соответствуют операционному профилю, то операции затронутые большим количеством тестов должны давать больший вклад при подсчете серьезности ошибки, которую они затрагивают.

Для разрешения данной проблемы, учитывается количество тестов ассоциированных с каждой операцией. Если на операцию влияют две ошибки,

$f_1$  и  $f_2$ , и если  $f_1$  выявляется большим количеством тестов нежели  $f_2$ , придается большая серьезность ошибке  $f_1$  нежели ошибке  $f_2$ .

Одним из путей для присвоения более высокой серьезности ошибке 1, чем ошибке 2 — это использование количества тестов как веса при вычислении серьезности ошибок. Пусть  $T_i$  — список тестов ассоциированных с операцией  $i$ . Пусть  $Op$  — множество  $m$  операций связанных с ошибкой  $X$ , а  $P_i$  — вероятность ассоциированная с операцией  $i$ . Серьезность ошибки  $X$  может быть определена как  $\sum_{i=1}^m P_i \times \|T_i\|$ .

По этому методу, серьезность ошибок 1, 2 и 3 в наших примерах следующие: серьезность ошибки 1 равна  $3 * 0,20 + 3 * 0,10 + 3 * 0,50 = 2,40$ ; серьезность ошибки 2 равна  $0,20 + 0,10 + 0,50 = 0,80$ ; серьезность ошибки 3 равна  $5 * 0,10 + 5 * 0,10 = 1,0$ .

Однако этот метод делает ошибку 3 более серьезной нежели ошибку 2, а это неправильно, так как ошибка 2, в отличие от ошибки 3, может влиять на наиболее часто используемую операцию. Это противоречит нашему утверждению, что ошибки встречающиеся в наиболее часто используемых операциях более серьезны, чем ошибки которые встречаются в менее часто используемых операциях. Поэтому, вводится некое значение барьера выше которого будет учитываться количество тестов и ниже которого — нет. Пусть  $P_H$  — вероятность использования наиболее часто используемой операции на которую влияет данная ошибка, а  $P_L$  — вероятность использования наименее часто используемой операции на которую влияет данная ошибка. Значение барьера для  $TH$  дано формулой:  $TH = (P_H + P_L) / 2$ .

Таким образом, значение барьера для примера с текстовым редактором будет следующее:  $TH = (0,50 + 0,10) / 2 = 0,30$ . Поэтому, серьезность ошибок основанная на данном значении барьера будет: серьезность ошибки 1 равна  $0,20 + 0,10 + 3 * 0,50 = 1,80$ ; серьезность ошибки 2 равна  $0,20 + 0,10 + 0,50 = 0,80$ ; серьезность ошибки 3 равна  $0,10 + 0,10 = 0,20$ .

## ЭМПИРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Было проведено исследование, цель которого изучить, как различные распределения и шкалы стоимости тестов и серьезности ошибок могут влиять на скорость их выявления с точки зрения метрики APFD<sub>c</sub>. Понятие критичности теста применялось для оценки серьезности ошибок в приоритезации. Рассмотрено влияние различных распределений и шкал стоимости тестов, серьезности ошибок и их комбинаций на относительную эффективность методов приоритезации.

### Объекты исследования

Как объекты данного исследования были использованы следующие программы:

- **empire** — сетевая игра состоящая из 63 014 – 64 396 строк кода, 10 версий, 1985 тестов и по 10 регрессивных ошибок во всех версиях, кроме первой;

- **grep** — программа поиска текста состоящая из 10 929 – 13 359 строк кода, 5 версий, 810 тестов и по от одной до четырех регрессивных ошибок во всех версиях, кроме первой;
- **flex** — генератор лексических анализаторов состоящий из 11 783 – 14 171 строк кода, 5 версий, 568 тестов и по от одной до восьми регрессивных ошибок во всех версиях, кроме первой;
- **make** — программа применяющаяся для построения ПО состоящая из 18 665 – 25 465 строк кода, 5 версий, 1044 тестов и по от трех до пяти регрессивных ошибок во всех версиях, кроме первой;
- **sed** — потоковый редактор состоящий из 8 063 – 11 911 строк кода, 3 версии, 1294 тестов и по от четырех до пяти регрессивных ошибок во всех версиях, кроме первой;
- **xearth** — программа отображающая картинку земного шара, состоящая из 13 165 – 24 179 строк кода, трех версий, 540 тестов и по от трех до четырех регрессивных ошибок во всех версиях, кроме первой.

Используя документацию для программы **empire**, были определены 182 операции, обычно используя прямую ассоциацию с командами. Так как каждый тест выполняет последовательность команд, было легко ассоциировать тест с затронутыми им операциями. Для других программ, тесты были сгенерированы исходя из языка спецификации тестов (test specification language (TSL)). Для каждой программы, была создана спецификация тестов базируясь на документации. Далее эти спецификации были преобразованы в тестовые фреймы (test frames) из которых были сгенерированы тесты. Операции были созданы для каждого выбора в файле спецификации тестов; затем некоторые операции с общими характеристиками были объединены между собой. Далее, используя информацию о том как были сгенерированы тесты, они были увязаны с операциями.

Для получения операционного профиля для программы **empire**, было задействовано несколько добровольцев, которые на протяжении некоторого времени играли в эту игру. Для других программ, операционный профиль был сгенерирован случайным образом.

В области разработки программного обеспечения очень сложно найти репрезентативную выборку программ, так как существует слишком большие различия, не только в их размерах, используемых языках программирования и стилях программирования, но и в классах решаемых задач. Для репрезентативного набора необходимо иметь доступ ко всем программам и случайным образом выбрать их подмножество, что не является возможным, поэтому были использованы программы, которые могут быть репрезентативными для своего класса (программы размером 8,000 – 65,000 строк, написанные на языке C и выполняющие роль утилит Unix и сетевой игры), но не являются репрезентативными для всех программ. Для получения более общих результатов необходимо собрать большее количество программ различных классов. Поэтому задачей данных исследований является не нахождение обобщающихся зависимостей, а эксплораторное исследование применяемых подходов для нахождения тенденций и иллюстрации их влияния на процесс приоритезации.

## Методы приоритизации

В исследовании были использованы следующие методы приоритизации:

- **fn-nofb** — приоритизация по общему покрытию функций. Вставляя в программу дополнительный код, можно определить для каждого теста, какие функции им покрыты. Эти тесты можно приоритизировать в соответствии с количеством покрытых ими функций, сортируя тесты в порядке убывания данного общего покрытия.

- **fn-fb** — приоритизация по дополнительному покрытию функций. Приоритизация по общему покрытию функций планирует тесты в порядке достижения совокупного покрытия функций. Однако, выполнив тест и покрыв некоторые функции, целесообразно при последующем тестировании покрыть еще не покрытые функции. Приоритизация по дополнительному покрытию функций выбирает тест, достигший наибольшего покрытия еще не покрытых функций, повторяя этот процесс до тех пор, пока ни один из оставшихся тестов не сможет увеличить покрытие функций. Когда это происходит, данный алгоритм применяется рекурсивно к оставшимся тестам.

- **diff-fn-nofb** — приоритизация по общему покрытию измененных функций. Этот метод похож на **fn-nofb**, но рассматривает только новые или измененные функции. При равенстве покрытых измененных функций, учитывается количество всех покрытых функций.

- **diff-fn-fb** — приоритизация по дополнительному покрытию измененных функций подобна приоритизации по дополнительному покрытию функций, за исключением того, что учитываются только измененные или новые функции. При равенстве покрытых измененных функций, учитывается количество всех покрытых функций.

- **random** упорядочивает тесты случайным образом.

Для того, чтобы учесть стоимость и критичность тестов в методах приоритизации, было найдено отношение критичности теста к его стоимости. В данном исследовании было рассмотрено три метода внедрения этого отношения в методы приоритизации:

- **Af** — тесты приоритизируются в соответствии с покрытием функций (с или без учета модификации программного кода). Отношение критичности теста к его стоимости имеет второстепенное значение и учитывается при равнозначности покрытия.

- **Mult** — тесты приоритизируются в соответствии с произведением покрытия функций (с или без учета модификаций программного кода) и отношения критичности теста к его стоимости. В данном случае вклад покрытия и стоимости с критичностью равнозначны.

- **Rf** — тесты приоритизируются в соответствии с отношением критичности теста к его стоимости, а покрытие функций (с или без учета модификаций программного кода) имеет второстепенное значение и учитывается при равнозначном отношении критичности к стоимости.

## Шкалы стоимости тестов

В исследовании были рассмотрены четыре шкалы стоимости тестов.

- **Unit** — данная шкала не различает между стоимостью тестов (в данном случае стоимость теста не учитывается).



- **Orig** — данная шкала присваивает каждому тесту его стоимость (настоящую либо искусственно сгенерированную) полученную описанными ранее методами.

- **Buck-lin** — в данной шкале, значения стоимости тестов (из шкалы **orig**) отсортированы и равномерно распределены в ячейки (стоимость тестов соответствует номеру ячейки начиная с единицы).

- **Buck-exp** — данная шкала подобна **buck-lin**, кроме того, что стоимость теста не номер ячейки  $n$ , а  $b^n - 1$ , где  $b = 2$  и  $n$  — номер ячейки (данная шкала — альтернатива предыдущей, которая увеличивает значимость наиболее дорогих тестов).

### Шкалы критичности тестов и серьезности ошибок

В исследовании были рассмотрены четыре шкалы критичности тестов и серьезности ошибок.

- **Unit** — шкала не различает между критичностью тестов и серьезностью ошибок (в данном случае критичность теста и серьезность ошибок не учитывается).

- **Orig** — данная шкала присваивает каждому тесту его критичность и каждой ошибке ее серьезность полученные описанными ранее методами.

- **Buck-lin** — в данной шкале, значения критичности тестов и серьезности ошибок (из шкалы **orig**) отсортированы и равномерно распределены в ячейки. Критичность тестов и серьезность ошибок вычисляется по номеру ячейки.

- **Buck-exp** — данная шкала подобна **buck-lin**, только вместо номера ячейки  $n$ , используется  $b^n - 1$ , где  $b = 2$ , а  $n$  — номер ячейки. Данная шкала — альтернатива предыдущей, которая увеличивает значимость наиболее серьезных ошибок и соответствующих им тестов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенное исследование состояло из трех частей. В первой части было рассмотрено влияние трех методов внедрения информации о стоимости и критичности тестов в процесс приоритизации. Во второй части было рассмотрено как влияет выбор шкалы стоимости тестов и серьезности ошибок на относительную эффективность методов приоритизации. В третьей части — рассмотрено для каждого метода приоритизации относительное влияние всех 16 комбинаций шкал на скорость выявления ошибок.

**Исследование 1.** В данном исследовании рассматриваются три метода комбинации информации (**af**, **mult** и **rf**) о стоимости и критичности тестов с информацией о покрытии элементов программного кода.

В данном исследовании были получены данные используя различные распределения (шкалы) стоимости тестов и серьезности ошибок (**orig/orig**, **buck-lin/buck-lin**, **buck-exp/buck-exp**) для каждого из пяти методов приоритизации и трех видов комбинации информации. Был проведен статистический анализ Анова. Результаты представлены в виде диаграмм размаха (рис. 3–6).

Как видно из графиков (рис. 3–6) для методов **fn-nofb** и **diff-fn-nofb**, в трех рассмотренных шкалах стоимости тестов и серьезности ошибок, **af** имел наилучшие результаты; а для методов **fn-fb** и **diff-fn-nofb**, **af** и **mult**

были значительно лучше чем **rf**. То есть, для методов без обратной связи (по общему покрытию функций), комбинация **af** была самая эффективная, а для методов с обратной связью (по дополнительному покрытию функций), как **af** так и **mult** являются эффективными. Анализ Апона показал, что не все результаты являются статистически значимыми (для  $\alpha = 0,05$ ). Значимыми являются: метод **fn-nofb** со шкалой **exp/exp** ( $p = 0,0234$ ), метод **fn-fb** со шкалами **orig/orig**, **buck-lin/buck-lin** и **buck-exp/buck-exp** ( $p = 0$ ), а также метод **diff-fn-fb** со шкалами **orig/orig** ( $p = 2,2622 \cdot 10^{-7}$ ), **buck-lin/buck-lin** ( $p = 1,926310^{-11}$ ) и **buck-exp/buck-exp** ( $p = 3,4632 \cdot 10^{-4}$ ).

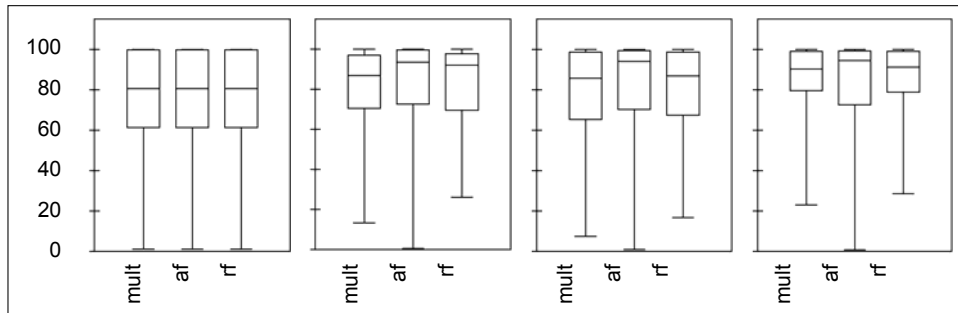


Рис. 3. Метод **fn-nofb** со шкалами, слева направо: **unit/unit**, **orig/orig**, **buck-lin/buck-lin** и **buck-exp/buck-exp**

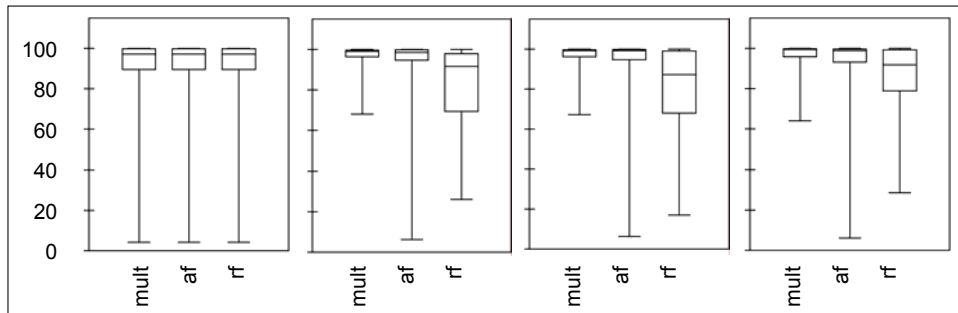


Рис. 4. Метод **fn-fb** со шкалами, слева направо: **unit/unit**, **orig/orig**, **buck-lin/buck-lin** и **buck-exp/buck-exp**

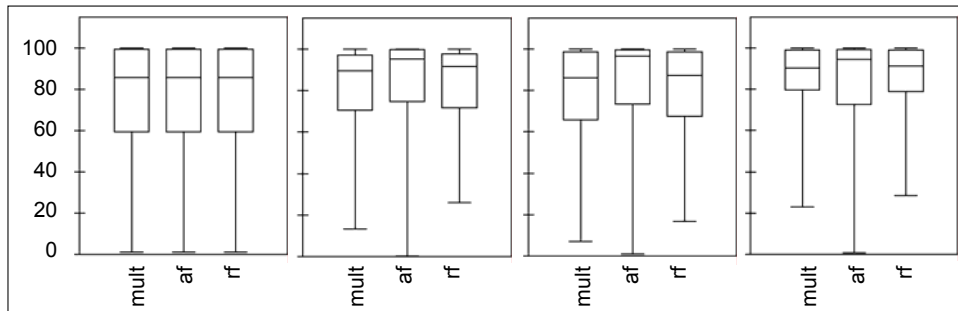


Рис. 5. Метод **diff-fn-nofb** со шкалами, слева направо: **unit/unit**, **orig/orig**, **buck-lin/buck-lin** и **buck-exp/buck-exp**

**Исследование 2.** В данном исследовании, было изучено влияние шкалы стоимости тестов и серьезности ошибок на относительную эффективность методов приоритизации. Для каждого из трех методов комбинации

информации и четырех комбинаций шкал (**unit/unit**, **orig/orig**, **buck-lin/buck-lin**, **buck-exp/buck-exp**) были сравнены друг с другом пять методов приоритезации. Подобно предыдущему исследованию, был проведен статистический анализ Anova. В каждом из двенадцати случаев, Anova анализ показал статистическую значимость различий между методами приоритезации. Наименьшее значение  $p = 0,0263$  было достигнуто **rf** комбинацией и **buck-exp/buck-exp** шкалой.

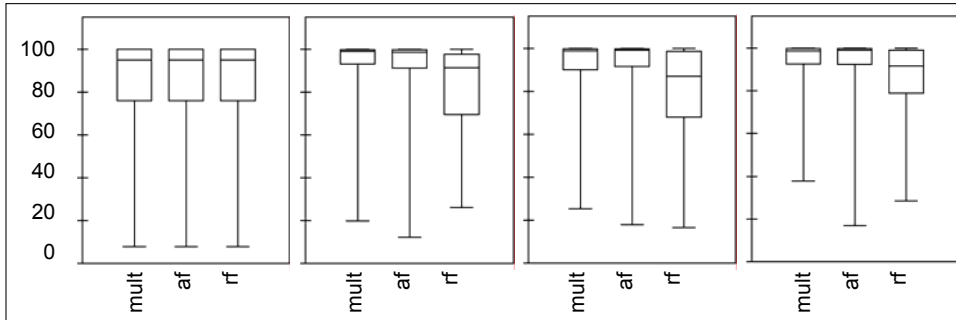


Рис. 6. Метод **diff-fn-fb** со шкалами, слева направо: **unit/unit**, **orig/orig**, **buck-lin/buck-lin** и **buck-exp/buck-exp**

Как мы видим из графиков (рис. 7–9) (представленных диаграммами размаха), с точки зрения среднего значения метрики  $APFD_C$ , при комбинации **af** шкала имеет незначительное влияние на относительную эффективность методов приоритезации. За исключением шкалы **orig/orig**, методы приоритезации в порядке убывания эффективности следующие: **fn-fb**, **fn-diff-fb**, **random**, **fn-diff-nofb**, **fn-nofb**. Также, с точки зрения среднего значения метрики  $APFD_C$ , при комбинации **mult**, шкала вовсе не имеет влияния на относительную эффективность методов приоритезации. С точки зрения среднего значения метрики  $APFD_C$ , при комбинации **rf**, шкала имеет более значительное влияние на относительную эффективность методов приоритезации. При данной комбинации, методы приоритезации имеют незначительное различие в их эффективности; гораздо больший вклад в их эффективность имеет шкала. В шкалах **orig/orig**, **buck-lin/buck-lin** и **buck-exp/buck-exp**, **random** метод был лучше, чем остальные методы приоритезации, что означает бесполезность приоритезации в данных случаях. С другой стороны, в шкале **unit/unit** стоимость фактически не учитывается и относительная эффективность методов приоритезация такая же как и в других комбинациях.

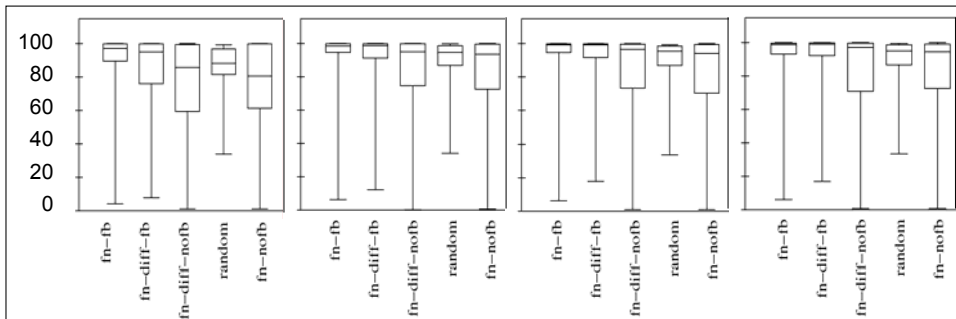


Рис. 7. **af** комбинация со шкалами, слева направо: **unit/unit**, **orig/orig**, **buck-lin/buck-lin** и **buck-exp/buck-exp**

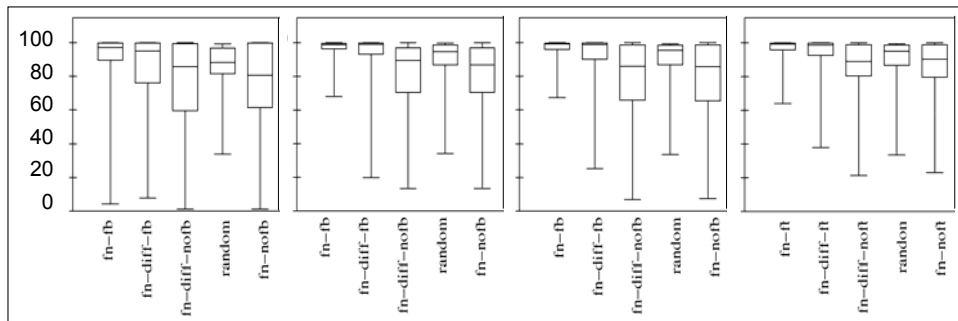


Рис. 8. Mult комбинация со шкалами, слева направо: **unit/unit**, **orig/orig**, **buck-lin/buck-lin** и **buck-exp/buck-exp**

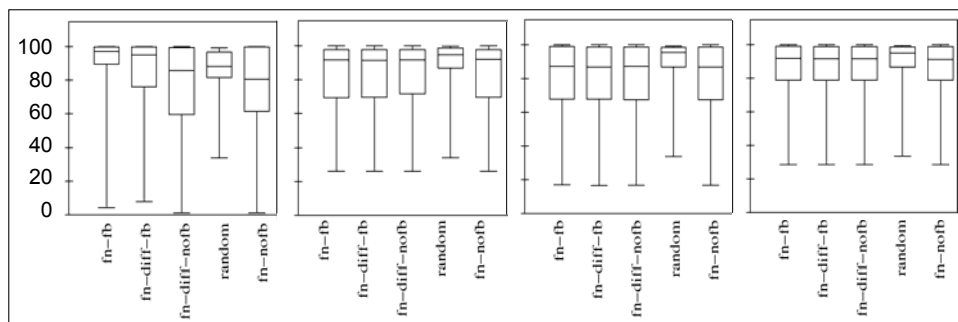


Рис. 9. Rf комбинация со шкалами, слева направо: **unit/unit**, **orig/orig**, **buck-lin/buck-lin** и **buck-exp/buck-exp**

**Исследование 3.** В данном исследовании было рассмотрено для четырех методов приоритизации и трех методов комбинации все 16 шкал. Для метода приоритизации **fn-fb** и комбинации **af**, различия в средних значениях  $APFD_C$  не являются статистически значимыми ( $p = 0,4313$ ). Во всех других одиннадцати случаях, различия статистически значимы (максимальное значение  $p = 0,0015$ ).

Как видно из графиков (рис. 10–13) представленных диаграммами размаха, для метода **fn-nofb**, размах средних значений  $APFD_C$  для различных шкал максимален для **rf** — от 74,92 (**unit/orig**) до 86,55 (**orig/unit**); затем идет **mult** — от 75,81 (**unit/unit**) до 85,84 (**buck-exp/buck-exp**); и наименьший размах для **af** — от 74,54 (**buck-exp/unit**) до 81,82 (**unit/buck-exp**). Для метода **fn-fb**, размах средних значений небольшой при комбинациях **af** и **mult** (меньше 5), но значителен для **rf** — от 75,04 (**unit/orig**) до 92,71 (**unit/unit**). Для метода **diff-fn-nofb**, размах максимален при **rf** — от 74,94 (**unit/orig**) до 86,85 (**orig/unit**), затем идет **mult** — от 76,07 (**buck-lin/unit**) до 85,62 (**buck-exp/buck-exp**); и наименьший размах при **af** — от 76,20 (**orig/unit**) и 84,15 (**buck-exp/buck-exp**). Для метода **diff-fn-fb**, размах максимален при **rf** — от 74,93 (**unit/orig**) до **orig/unit** (86,67); затем идет **af** — от 85,01 (**orig/unit**) до 91,29 (**buck-exp/buck-lin**); наименьший размах имеет место при **mult** — от 86,19 (**unit/unit**) до 92,62 (**buck-exp/buck-lin**).

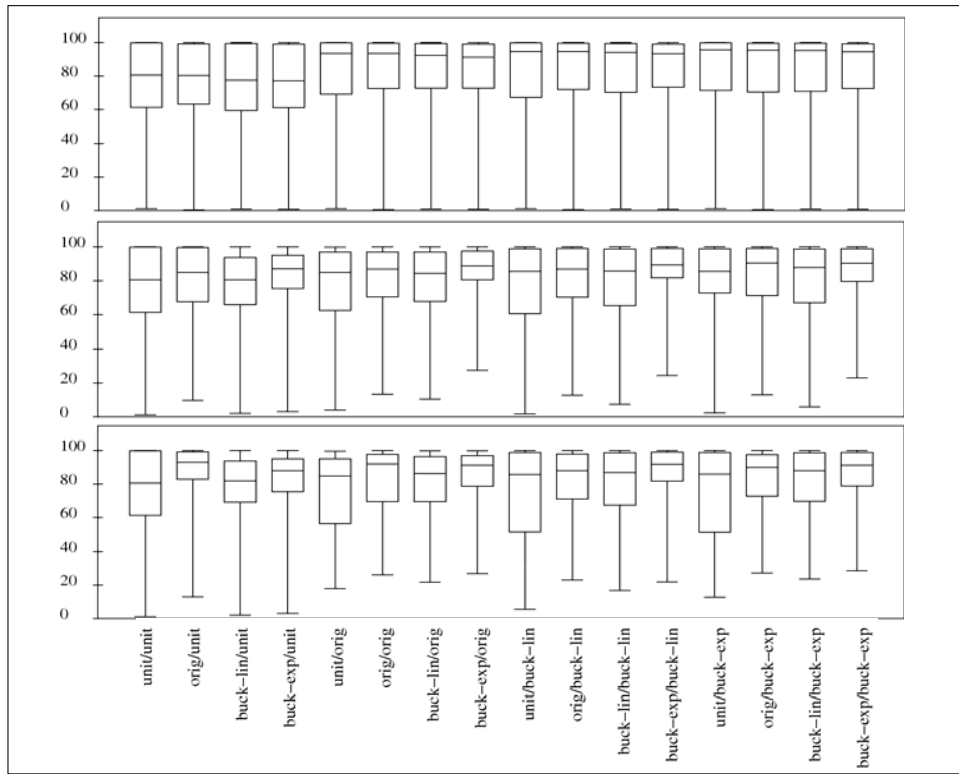


Рис. 10. Метод **fn-nofb** з комбінаціями, зверху вниз: **af**, **mult** і **rf**

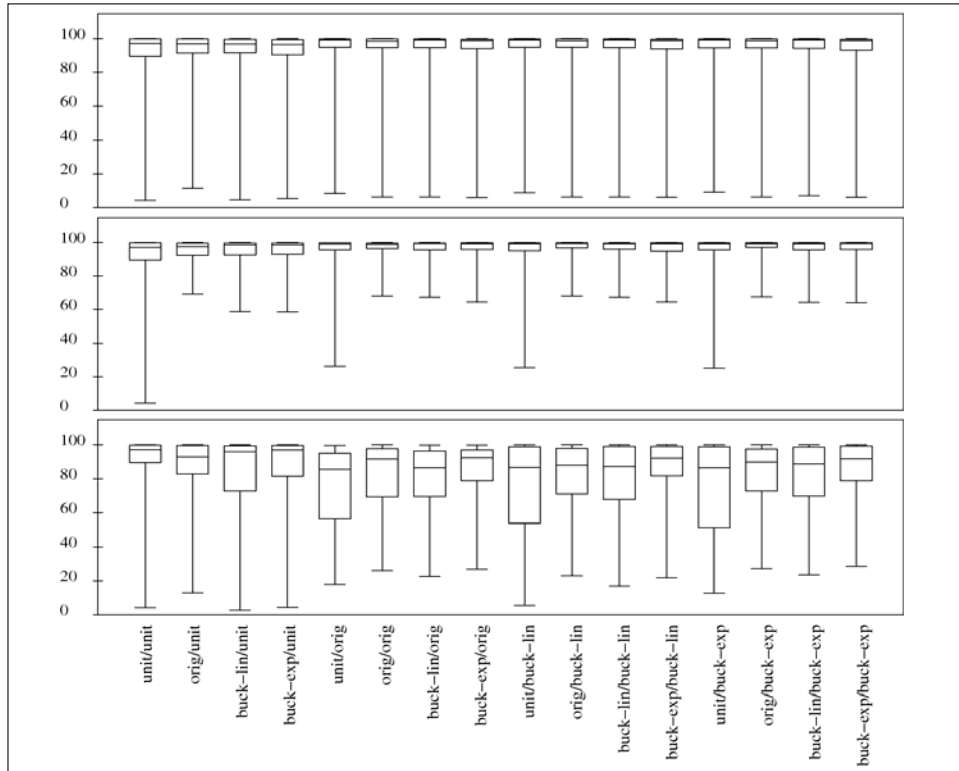


Рис. 11. Метод **fn-fb** з комбінаціями, зверху вниз: **af**, **mult** і **rf**

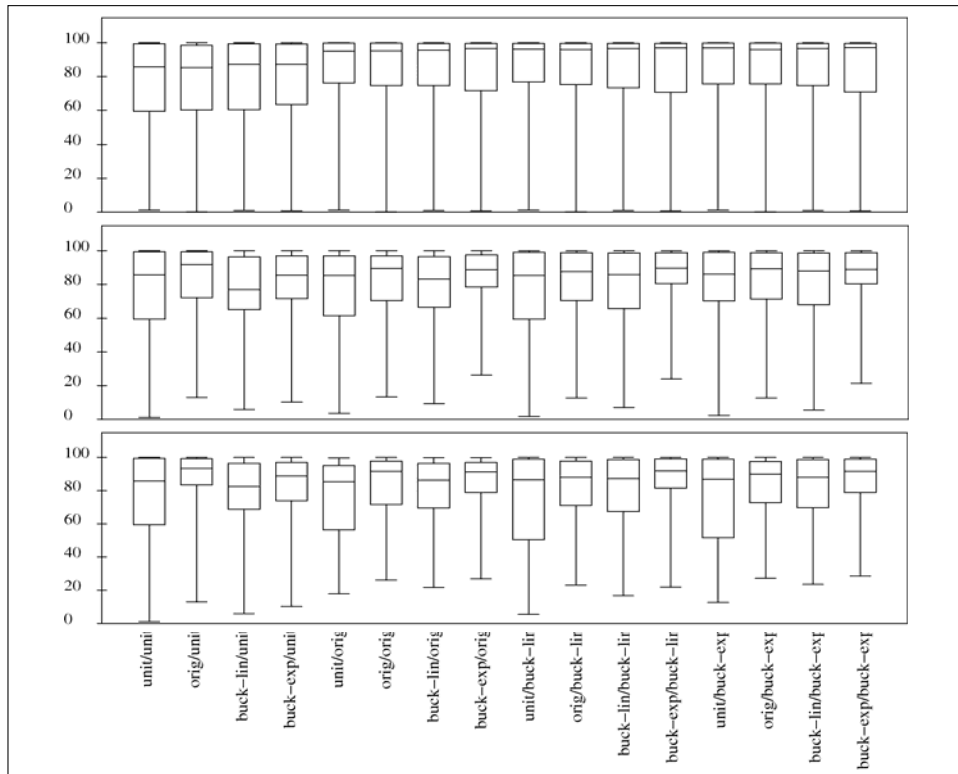


Рис. 12. Метод **diff-fn-nofb** с комбинациями, сверху вниз: **af**, **mult** и **rf**

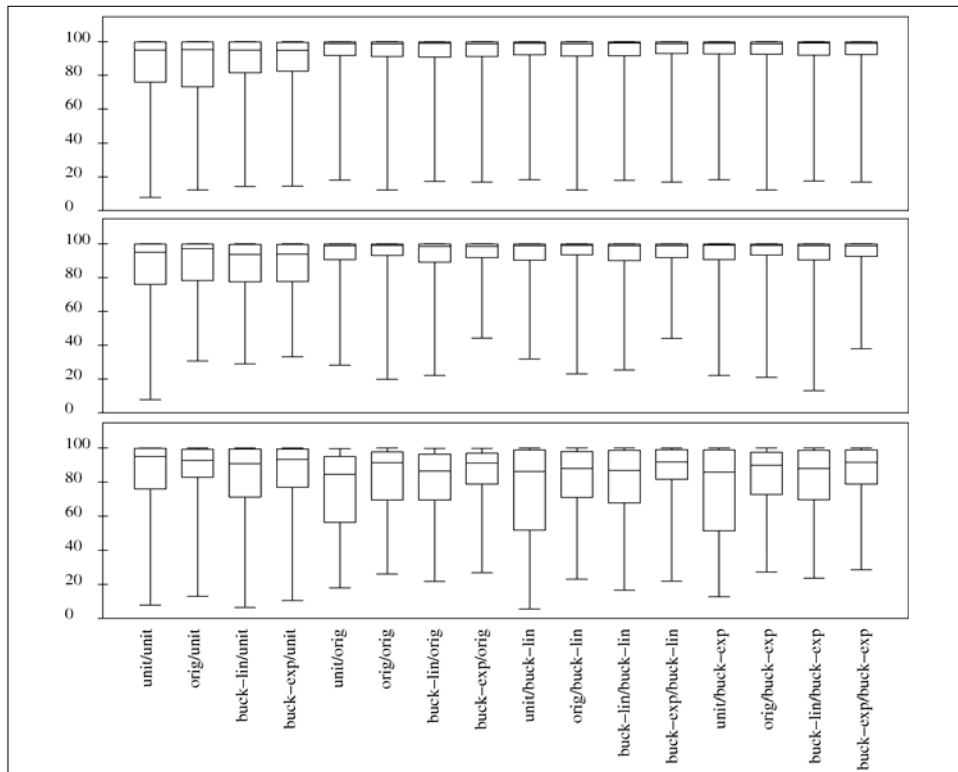


Рис. 13. Метод **diff-fn-fb** с комбинациями, сверху вниз: **af**, **mult** и **rf**

## ВЫВОДЫ

В данной работе была рассмотрена приоритезация, учитывающая стоимость тестов и серьезность ошибок. В отличие от предыдущих исследований, серьезность ошибок была основана на их влиянии на надежность программы. Несколько программ были использованы как объекты исследования. В одной из них были использованы реальные данные о стоимости тестов и реальный операционный профиль. Также, как стоимость тестов, так и серьезность ошибок были исследованы в четырех различных шкалах и изучено их влияние на эффективность приоритезации. Были рассмотрены три подхода к внедрению информации о стоимости и критичности тестов в процесс приоритезации и исследована их эффективность.

Выбор шкалы имеет значительное влияние на эффективность приоритезации. Важно то, что выбор лучшего метода приоритезации зависит от шкалы стоимости тестов и серьезности ошибок. Разные шкалы неодинаково влияют на разные методы приоритезации. Поэтому выбор метода приоритезации должен учитывать шкалу. Также, методы комбинации **af** и **mult**, а особенно **af**, дают наилучшие результаты.

Автор благодарит Г. Ротермела, С. Элбаума и Д. Рутруфа за участие в проведении описанных исследований.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Ghezzi C., Jazayeri M., Mandrioli D.* Fundamentals of Software Engineering. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 1991. — 573 p.
2. *Avritzer A., Weyuker E.J.* The automatic generation of load test suites and the assessment of the resulting software // IEEE Transactions on Software Engineer. — 1995. — **21**, № 9. — P. 705–716.
3. *Wong W., Horgan J., London S., Agrawal H.* A study of effective regression testing in practice // In Proceedings of the Eighth International Symposium on Software Reliability Engineering. — Albuquerque, NM, USA. — 1997. — P. 230–238.
4. *Rothermel G., Untch R., Chu C., Harrold M.J.* Test case prioritization: an empirical study // In Proceedings of the International Conference on Software Maintenance. — Oxford, England, UK. — 1999. — P. 179–188.
5. *Elbaum S., Malishevsky A., Rothermel G.* Prioritizing test cases for regression testing // In Proceedings of the International Symposium on Software Testing and Analysis. — Portland, Oregon. — 2000. — P. 102–112.
6. *Elbaum S., Malishevsky A., Rothermel G.* Incorporating Varying Test Costs and Fault Severities into Test Case Prioritization // Technical Report 00-60-09. — Computer Science Department. — Oregon State University. — August 2000. — 14 p.
7. *Rothermel G., Untch R.H., Chu C., Harrold M.J.* Test case prioritization // IEEE Transactions on Software Engineering. — 2001. — **27**, № 10. — P. 929–948.
8. *Jones J.A., Harrold M.J.* Test-suite reduction and prioritization for modified condition/decision coverage // In Proceedings of the International Conference on Software Maintenance. — Florence, Italy. — 2001. — P. 92–101.
9. *Elbaum S., Malishevsky A., Rothermel G.* Incorporating varying test costs and fault severities into test case prioritization // In Proceedings of the 23rd International Conference on Software Engineering. — Toronto, Ontario, Canada. — May 2001. — P. 329–338.

10. *Elbaum S., Malishevsky A., Rothermel G.* Test Case Prioritization: A family of empirical studies // *IEEE Transactions On Software Engineering*. — 2002. — **28**, № 2. — P. 159–182.
11. *Srivastava A., Thiagarajan J.* Effectively prioritizing tests in development environment // *In Proceedings of the International Symposium on Software Testing and Analysis*. — Via di Ripetta, Rome – Italy. — 2002. — P. 97–106.
12. *Kim J.-M., Porter A.* A history-based test prioritization technique for regression testing in resource constrained environments // *In Proceedings of the International Conference on Software Engineering*. — Orlando, Florida, USA. — 2002. — P. 119–129.
13. *Malishevsky A.G.* Test case prioritization // Ph.D. Dissertation. — Oregon State University, Corvallis, Oregon, USA. — 2003. — 291 p.
14. *Do H., Rothermel G. and Kinneer A.* Empirical Studies of Test Case Prioritization in a JUnit Testing Environment // *Proceedings of the International Symposium on Software Reliability Engineering*. — Saint-Malo, Bretagne, France. — November 2004. — P. 113–124.
15. *Srikanth H.* Value-driven system level test case prioritization // Ph.D. Dissertation. — North Carolina State University, Raleigh, NC. — 2005. — 92 p.
16. *Korel B., Tahat L.H. and Harman M.* Test Prioritization Using System Models // *In Proceedings of the 21st IEEE International Conference on Software Maintenance*. — Budapest, Hungary. — September 2005. — P. 559–568.
17. *Do H. and Rothermel G.* A Controlled Experiment Assessing Test Case Prioritization Techniques via Mutation Faults // *Proceedings of the IEEE International Conference on Software Maintenance*. — Budapest, Hungary. — September 2005. — P. 411–420.
18. *Do H., Rothermel G. and Kinneer A.* Prioritizing JUnit test cases: An empirical assessment and cost-benefits analysis // *Empirical Software Engineering: An International Journal*. — March 2006. — **11**, № 1. — P. 33–70.
19. *Do H. and Rothermel G.* On the use of mutation faults in empirical assessments of test case prioritization techniques // *IEEE Transactions on Software Engineering*. — September 2006. — **32**, № 9. — P. 733–752.
20. *Малышевский А.Г.* Приоритизация тестов в регрессивном тестировании // *Системні дослідження та інформаційні технології*. — 2006. — № 4. — С. 16–32.
21. *Malishevsky A.G., Ruthruff J., Rothermel G. and Elbaum S.* Cost-cognizant test case prioritization // *Technical Report TR-UNL-CSE-2006-0004*. — Department of Computer Science and Engineering. — University of Nebraska — Lincoln. — March 2006. — 41 p.
22. *Малышевский А.Г.* Использование информации о стоимости тестов и серьезности ошибок в процессе приоритизации тестов // *Системні дослідження та інформаційні технології*. — 2008. — № 1. — С. 63–78.
23. *Musa J.* *Software Reliability Engineering*. — NY: McGraw-Hill, 1999. — 391 p.

*Поступила 27.07.2008*



## ЕЛЕМЕНТИ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ДИНАМІКИ

Г.П. ПОВЕЩЕНКО

Наведено математичну модель, яка враховує вплив процесів міграції і дифузії носіїв інформації, спілкування між ними та зовнішній вплив на процеси вибору та відбору. Розрахунки за моделлю демонструють наявність у системі явища мультистабільності, стійкості вибору, хаотичних та перехідних режимів.

### ВСТУП

Інформація — необхідний ресурс для існування людини. Інформація виконує комунікативну функцію, тобто забезпечує «спілкування» (включно до знищення) в живій природі. Існує думка, що інформація є однією з початкових субстанцій реального світу разом із речовиною та енергією, а всі інші інформаційні явища (знання, інтелект тощо) є похідними від інформації [1].

Далі будемо використовувати таке визначення: інформація — зафіксований вибір одного варіанту з множини можливих і рівноімовірних. Для існування суспільства суттєве значення має умовна інформація: мова (відповідність між звуками та буквами), гроші (відповідність між працею й товаром), правила поведінки чи менталітет (відповідність між поведінкою та реакцією суспільства) та інші умовні кодові алгоритми або відповідність між елементами з різних множин.

Із визначення цінності інформації випливає, що мета і цінність інформації пов'язані — за відсутності мети будь-яка інформація має нульову цінність. Тому в реальних задачах має значення саме цінна інформація, а не будь-яка. Умовою виникнення цінної умовної інформації є антагонізм та конкуренція умовних інформацій [2]. Аналіз суспільних процесів вимагає введення відповідних способів вимірювання параметрів, наведених вище. Оскільки йдеться про відповідність між двома множинами (наприклад, між множиною місцевих бюджетів і множиною джерел наповнення бюджету або між множиною політичних партій і множиною їх прихильників тощо), то така інформація може мати назву *операторна* інформація (відповідність, відображення, функція, оператор — формально рівноправні терміни).

**Мета роботи** — спроба формалізації динаміки інформаційної системи, яка складається з декількох носіїв інформації різного типу.

### МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

Інформаційна система — рецепція інформації (процес прийняття — однозначний вибір на основі попередньої інформації); генерація інформації

(процес створення — випадковий вибір у випадку нестачі інформації); фіксація інформації (процес реєстрації) — має бути автономною, бо має значення самовільне виникнення інформації та мети всередині системи, а в неавтономних системах мету може бути нав'язано ззовні.

Система має складатися з декількох об'єктів однієї множини (або типів інформації). Необхідно також враховувати можливість зміни структури системи, наприклад, зникнення одного з елементів [2].

Конкретний варіант інформаційної динамічної системи може мати вигляд [3, 4]

$$\frac{\partial x}{\partial \tau} = d\Delta x - m \operatorname{grad} x + x(yz_* - y_*z) + bxz(x_* - x) = f_x; \quad (1)$$

$$\frac{\partial y}{\partial \tau} = d\Delta y - m \operatorname{grad} y + y(x_*z - xz_*) + ryz(y_* - y) = f_y; \quad (2)$$

$$x + y + z = 1, \quad (3)$$

де

$$x = \frac{X}{N}; \quad y = \frac{Y}{N}; \quad z = \frac{Z}{N}; \quad x_* = \frac{X_*}{N}; \quad y_* = \frac{Y_*}{N}; \quad z_* = \frac{Z_*}{N}; \quad (4)$$

$$X + Y + Z = N; \quad X_* + Y_* + Z_* = N; \quad (5)$$

$$\tau = \frac{t}{t_s}; \quad s = \frac{l}{L}; \quad b = pt_s; \quad r = qt_s; \quad m = \frac{t_s}{t_m}; \quad d = \frac{t_s}{t_d}; \quad (6)$$

$N$  — кількість варіантів операторної інформації або загальна кількість елементів-носіїв інформації різних типів (наприклад, різні мови, ідеї, релігії, валюти, державні устрої тощо);  $X, Y, Z$  — кількість елементів-носіїв відповідної інформації (тобто кожний елемент робить вибір і має інформацію певного типу);  $X_*, Y_*, Z_*$  — «змушена» стаціонарна кількість елементів-носіїв відповідної інформації;  $0 \leq x, y, z \leq 1$  — концентрація елементів-носіїв інформації  $x, y, z$ -типу;  $0 \leq x_*, y_*, z_* \leq 1$  — «змушена» стаціонарна концентрація елементів-носіїв відповідної інформації;  $t$  — поточний час;  $0 \leq l \leq L$  — поточна просторова координата системи;  $L \sim \sqrt{\text{area of the system}}$  — просторовий масштаб системи;  $t_s$  — характерний час спілкування між носіями інформації;  $t_m = \frac{L}{v_m}$  — характерний час міграції носіїв інформації;  $v_m$

— швидкість міграції носіїв інформації;  $t_d = \frac{L^2}{D}$  — характерний час дифузії носіїв інформації;  $D$  — коефіцієнт дифузії, од. площі /од. часу;  $p, q$  — параметри (темпи) керування, од./од. часу.

Надалі розглядатимемо симетричний варіант системи (1)–(3), коли параметри  $d$  та  $m$  однакові для елементів усіх типів, що створює для них рівні можливості. Перші два члени в правій частині системи рівнянь описують можливість дифузії або міграції елементів у просторі; треті — механізм спілкування (наприклад, міжвидової боротьби й антагонізму), а четверті —

керування вибором. Для кожного конкретного процесу можливі відповідні конкретні варіанти системи рівнянь.

Загальний інтеграл системи (3) або (5) типу «закону збереження» чи «константи загальної організації» формалізує область визначення системи і є однією із системних характеристик, яка відповідає за внутрішню «конкуренцію» між  $x$ ,  $y$  та  $z$ .

Параметрам  $p$ ,  $q$  можна надати різну змістовну інтерпретацію як параметрам керування. Наприклад, якщо  $n_x(t)$ ,  $n_y(t)$  — формалізована кількість адміністративних або рекламних заходів в часі, то параметри

$$p = \frac{d}{dt}(\ln n_x); \quad q = \frac{d}{dt}(\ln n_y) \quad (7)$$

можна вважати усередненими темпами керування. За наявності надто потужного керування система «змушена» вибирати стан  $x = x_*$ ;  $y = y_*$ ;  $z = z_*$ .

За умови повільної міграції та дифузії

$$t_m \gg t_s; \quad t_d \gg t_s \quad (8)$$

система (1)–(3) має вигляд

$$\frac{dx}{d\tau} = x(yz_* - y_*z) + bxz(x_* - x) = f_x; \quad (9)$$

$$\frac{dy}{d\tau} = y(x_* - x) + ryz(y_* - y) = f_y; \quad (10)$$

$$x + y + z = 1. \quad (11)$$

Систему (9)–(11) можна записати у вигляді двох рівнянь

$$\frac{dx}{d\tau} = xyz_* - xy_*(1 - x - y) + bx(x_* - x)(1 - x - y) = f_x; \quad (12)$$

$$\frac{dy}{d\tau} = x_*y(1 - x - y) - xyz_* + ry(y_* - y)(1 - x - y) = f_y. \quad (13)$$

Така форма надає можливості аналізувати поведінку системи в часі за допомогою фазового простору.

### ПЛЮРАЛІЗМ ВИБОРУ

Інформаційна система має бути *мультистабільною*, тобто мати не менше двох стаціонарних станів, серед яких і здійснюється вибір [2]. Система (12), (13) може мати до восьми стаціонарних станів ( $f_x = 0$ ,  $f_y = 0$ ), оскільки згідно із (3) вона не має тривіального стану

$$x \text{ — стан} \quad x_s = 1; \quad y_s = 0; \quad z_s = 0; \quad (14)$$

$$y \text{ — стан} \quad x_s = 0; \quad y_s = 1; \quad z_s = 0; \quad (15)$$

$$z \text{ — стан} \quad x_s = 0; \quad y_s = 0; \quad z_s = 1; \quad (16)$$

$$x, z \text{ — стан} \quad x_s = x_* - \frac{y_*}{b}; \quad y_s = 0; \quad z_s = 1 - x_s; \quad (17)$$

$$y, z \text{ — стан} \quad x_s = 0; \quad y_s = y_* + \frac{x_*}{r}; \quad z_s = 1 - y_s; \quad (18)$$

$$\text{«змушений» стан} \quad x_s = x_*; \quad y_s = y_*; \quad z_s = z_*; \quad (19)$$

$$x, y, z \text{ — стан} \quad x_s = x_1 = \frac{1 - y_s}{1 + \frac{z_*}{r(y_* - y_s) + x_*}};$$

$$y_s = y_1 = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}; \quad z_s = 1 - x_1 - y_1; \quad (20)$$

$$x, y, z \text{ — стан} \quad x_s = x_2 = \frac{1 - y_s}{1 + \frac{z_*}{r(y_* - y_s) + x_*}};$$

$$y_s = y_2 = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}; \quad z_s = 1 - x_2 - y_2; \quad (21)$$

$$A = br + r^2; \quad B = b(rx_* - x_* - 2r) + r(y_* - ry_* - 2);$$

$$C = 1 - y_* - brx_* + br + bx_* + ry_*. \quad (22)$$

Точки біфуркації  $x_1 = x_*$ ,  $y_1 = y_*$  маємо за умов  $x_* = y_*$  та

$$b = \frac{1}{z_*}; \quad r = -\frac{1}{z_*}. \quad (23)$$

Симетричний стан  $x_1 = y_1$  можливий за умов  $x_* = y_*$  та

$$b \neq \frac{1}{z_*}; \quad r \neq -\frac{1}{z_*}. \quad (24)$$

Паритетний стан  $x_1 = y_1 = z_1 = 1/3$  відповідає умовам  $x_* = y_*$  та

$$b = 3; \quad r = -3. \quad (25)$$

Звідси випливає, що за умови паритету темпи керування

$$p = \frac{3}{t_s}; \quad q = -\frac{3}{t_s}. \quad (26)$$

Очевидно, стаціонарні стани (14)–(18) розташовано на межах системи, а (19)–(21) — на всій області визначення системи (3). Конкретні приклади наведено на рис. 1–3. На рис. 1 система «вибирає» стійкий «вузол»  $x_s = 1$ ;  $y_s = 0$  за умови  $b = -13$ ;  $r = 1,3$ ;  $x_* = 0,4$ ;  $y_* = 0,35$ ;  $x_1 = 0,237$ ;  $y_1 = 0,692$ ;  $x_2 = 0,39$ ;  $y_2 = 0,399$ ;  $x(0) = x_2$ ;  $y(0) = 0,42$ . Стрілкою вказано напрямок руху.

Система здійснює деструктивний вибір граничного стану «монопольного» типу, що означає руйнацію її структури. Спочатку система переходить у режим  $x + y = 1$ , тобто з системи вилучається  $z$ -елемент, а потім вилучається  $y$ -елемент. Така поведінка не надто схожа на поведінку інформаційної системи. На рис. 2 система «вибирає» стійкий «вузол»  $x_2; y_2$  за умови  $b = 1; r = 20; x_* = 0,4; y_* = 0,3; x_1 = 0,509; y_1 = 0,283; x_2 = 0,767; y_2 = 0,16; x(0) = 0,5745067; y(0) = 0,1$ . Стрілкою вказано напрямок руху. Система здійснила конструктивний вибір. Спочатку вона намагається обрати варіант  $x_1; y_1$ , але він виявився нестійким, тому система певний час «вагається», залишаючись в цьому стані, а потім вибирає варіант  $x_2; y_2$ . Це відомий із практики «гістерезис мислення» — феномен затримки або запізнення з вибором рішення. Рис. 3 відрізняється від рис. 2 практично несуттєвою зміною величини початкової умови  $x(0)$ , яка може статися через збурення системи.

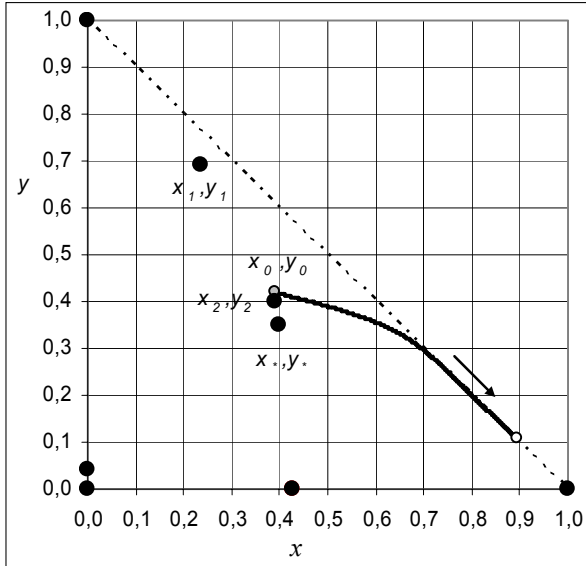


Рис. 1. Вісім стаціонарних точок системи

Рис. 2 відрізняється від рис. 1 фазовим портретом та перехідним процесом. Тут система «вибирає» стійкий «вузол»  $x_*, y_*$  за умови  $b = 1; r = 20; x_* = 0,4; y_* = 0,3; x_1 = 0,509; y_1 = 0,283; x_2 = 0,767; y_2 = 0,16; x(0) = 0,5745067; y(0) = 0,1$ . Стрілкою вказано напрямок руху. Система здійснила конструктивний вибір. Спочатку вона намагається обрати варіант  $x_1; y_1$ , але він виявився нестійким, тому система певний час «вагається», залишаючись в цьому стані, а потім вибирає варіант  $x_2; y_2$ . Це відомий із практики «гістерезис мислення» — феномен затримки або запізнення з вибором рішення. Рис. 3 відрізняється від рис. 2 практично несуттєвою зміною величини початкової умови  $x(0)$ , яка може статися через збурення системи.

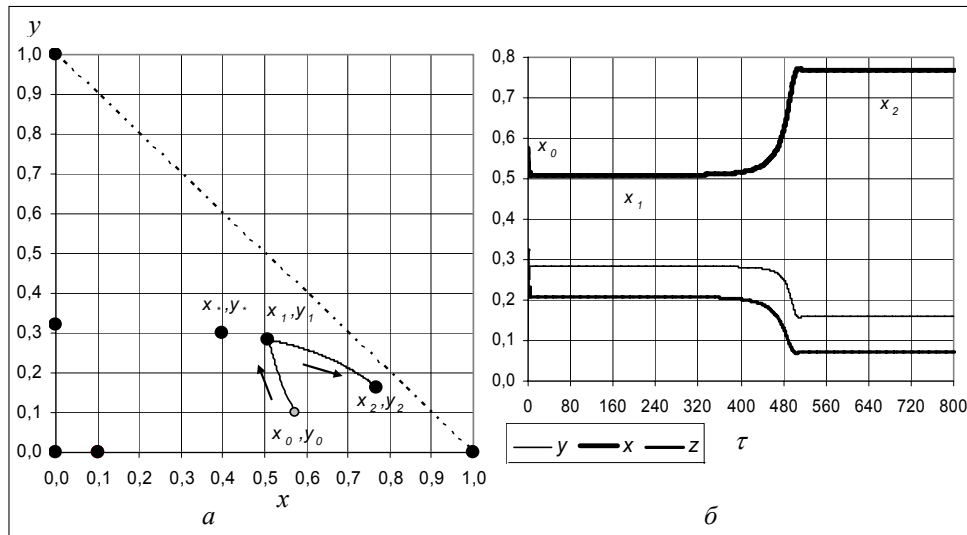


Рис. 2. Вісім стаціонарних точок системи: а — фазовий портрет, б — перехідний процес

Тут система «вибирає» стійкий «вузол»  $x_*, y_*$  за умови  $b = 1; r = 20; x_* = 0,4; y_* = 0,3; x_1 = 0,509; y_1 = 0,283; x_2 = 0,767; y_2 = 0,16;$

$x(0) = 0,5745065333$ ;  $y(0) = 0,1$ . Стрілкою вказано напрямок руху. Випадкове збурення початкових умов змушує систему здійснювати зовсім інший вибір. Так само змінити еволюцію процесу можуть і несуттєві збурення параметрів системи. Стан  $x_1, y_1$  є точкою біфуркації, де розгалужується процес вибору. Маємо бістабільність вибору. Нова інформація створюється в результаті випадкового вибору при нестійкості вихідного стану системи і за наявності декількох більш стійких станів, серед яких саме і відбувається вибір. Створення (генерація) інформації має характер фазового переходу. Це впорядкованість стрибком («порядок через флуктуації»), що відповідає сучасній динамічній світоглядній концепції станів та раптових змін [5].

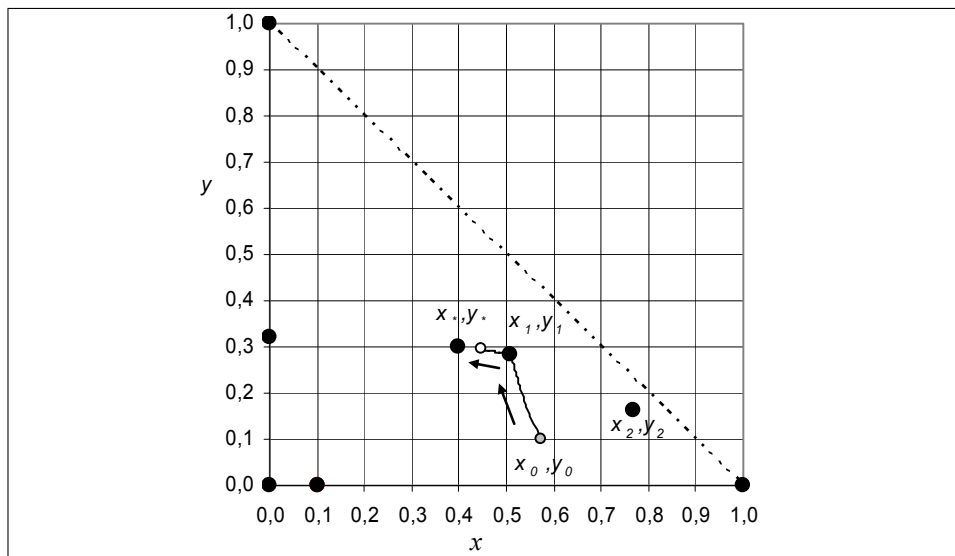


Рис. 3. Вісім стаціонарних точок системи

### СТАБІЛЬНІСТЬ ВИБОРУ

Вибраний системою стан має бути *стійким*, тобто зберігатися досить довго, що є ознакою дисипативності системи. Зауважимо, що у разі єдиного стійкого стану система не є мультистабільною і, відповідно, не є інформаційною, бо в такому випадку інформації не виникає [2]. Для оцінки стійкості стаціонарного стану необхідно визначити його характеристичні корені.

Елементи характеристичної матриці системи (12), (13)

$$\frac{\partial f_x}{\partial x} = a_{11} = y_s z_* - y_* (1 - x_s - y_s) + x_s y_* + b(x_* - 2x_s)(1 - x_s - y_s) - bx_s(x_* - x_s); \quad (27)$$

$$\frac{\partial f_x}{\partial y} = a_{12} = x_s z_* + x_s y_* - bx_s(x_* - x_s); \quad (28)$$

$$\frac{\partial f_y}{\partial x} = a_{21} = -x_* y_s - y_s z_* - ry_s(y_* - y_s); \quad (29)$$

$$\frac{\partial f_y}{\partial y} = a_{22} = x_*(1 - x_s - y_s) - x_*y_s - x_*z_* + r(y_* - 2y_s)(1 - x_s - y_s) - ry_s(y_* - y_s). \quad (30)$$

Дивергенція системи (12), (13)

$$S = \frac{\partial f_x}{\partial x} + \frac{\partial f_y}{\partial y} = y_s - y_* + x_* - x_s + 3x_sy_* - 3x_*y_s + b[(x_* - 2x_s)(1 - x_s - y_s) - x_s(x_* - x_s)] + r[(y_* - 2y_s)(1 - x_s - y_s) - y_s(y_* - y_s)]. \quad (31)$$

Детермінант системи (12), (13)

$$\Delta = \frac{\partial f_x}{\partial x} \frac{\partial f_y}{\partial y} - \frac{\partial f_x}{\partial y} \frac{\partial f_y}{\partial x}. \quad (32)$$

Характеристичні корені системи

$$\lambda^2 - S\lambda + \Delta = 0; \quad \lambda_{1,2} = \frac{S \pm \sqrt{S^2 - 4\Delta}}{2}. \quad (33)$$

Умовою стійкості стаціонарного стану є від'ємні значення дійсних частин характеристичних коренів. За нульової дивергенції

$$\lambda_{1,2} = \pm \sqrt{-\Delta}, \quad (34)$$

а це означає, що в разі додатного детермінанта система демонструє періодичну в часі поведінку — відбувається когерентна цивілізована конкуренція носіїв різних ідей (рис. 4). Тут показано коливання типу «центр» за умови  $b=1,2$ ;  $r=1,6$ ;  $x_*=-0,4$ ;  $y_*=0,3$ ;  $x_1=0,184$ ;  $y_1=0,098$ ;  $x(0)=0,4$ ;  $y(0)=0,42$ . Процес нагадує відомий процес співіснування видів за моделлю Лотки-Вольтери. У цьому конкретному випадку стаціонарного стану  $x_s = x_*$ ,  $y_s = y_*$  в залежності від значень  $b$  та  $r$  дивергенція

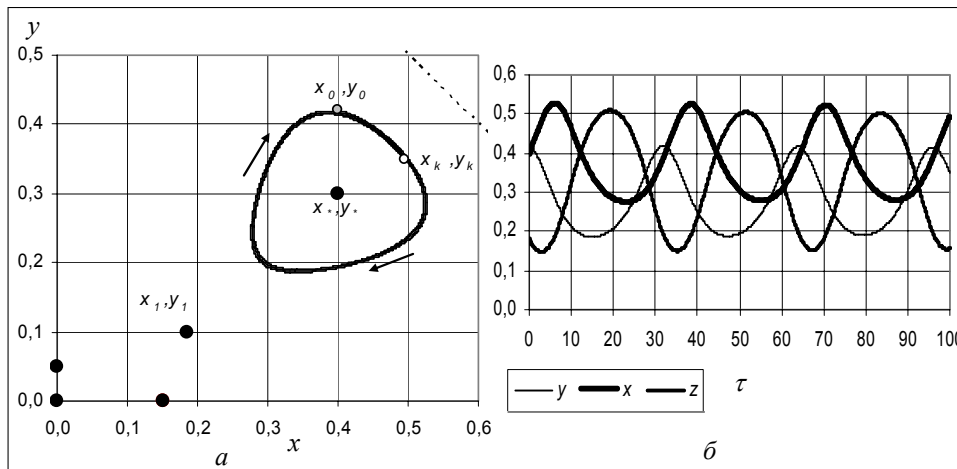


Рис. 4. Коливання типу «центр»:  $a$  — фазовий портрет,  $b$  — періодичний процес

$$S = -z_*(bx_* + ry_*) \quad (35)$$

може мати різні знаки. Нульова дивергенція відповідає умові

$$b = 0; \quad r = 0; \quad (36)$$

умові пропорційності  $b, r$  за різних знаків (рис. 4)

$$\frac{bx_*}{ry_*} = -1, \quad (37)$$

або умові руйнування цілісності системи

$$z_* = 0, \quad (38)$$

внаслідок чого стійким станом системи стає її границя  $x + y = 1$ ; ( $x_* + y_* = 1$ ;  $x_1 + y_1 = 1$ ;  $x_2 + y_2 = 1$ ), і процес спрямовується на вилучення із системи одного з структурних елементів.

На рис. 5 зображено, що конкуренція носіїв двох  $x, y$ -ідей виводить систему на границю області існування і має характер граничного циклу з тимчасовим періодичним «використанням» носіїв  $z$ -ідеї, за умови  $b = 150,32967$ ;  $r = -136,89746$ ;  $x_1 = 0,53$ ;  $y_1 = 0,463$ ;  $x_* = 0,4$ ;  $y_* = 0,3$ ;  $x(0) = x_*$ ;  $y(0) \approx y_*$ . Привертає увагу надзвичайне зловживання керуванням процесу (значення параметрів керування  $b, r$ ). Зауважимо, що збудження граничного циклу наближає систему за характером боротьби до біологічних систем.

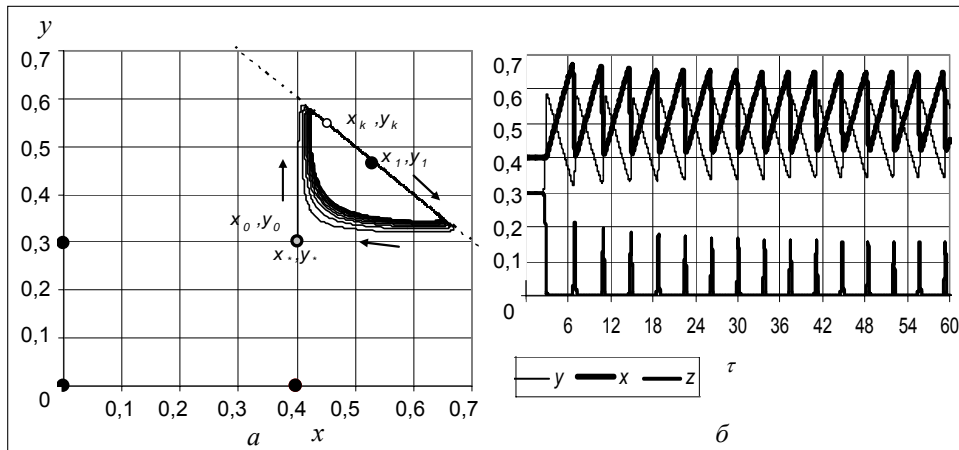


Рис. 5. Самозбудження граничного циклу:  $a$  — фазовий портрет,  $b$  — періодичний процес

На рис. 6 показано, що граничний цикл може бути збудженим у будь-якій точці фазового простору, наприклад, за умови  $b = 0,6$ ;  $r = 2,1$ ;  $x_1 = 0,5919$ ;  $y_1 = 1,555$ ;  $x_* = 0,4$ ;  $y_* = 0,3$ ;  $x(0) = x_2$ ;  $y(0) \approx y_2$ . Можна показати також, що система демонструє й іншу різноманітну поведінку на кшталт «сідла», стійкого або нестійкого «вузла» і «фокусу».

## ХАОП

Розглянемо стаціонарний стан системи (1)–(3), який має бути розподілений у просторі. Для одновимірного випадку маємо систему рівнянь



$$d \frac{\partial^2 x}{\partial s^2} - m \frac{\partial x}{\partial s} + x[yz_* - y_*(1-x-y)] + bx(1-x-y)(x_* - x) = 0; \quad (39)$$

$$d \frac{\partial^2 y}{\partial s^2} - m \frac{\partial y}{\partial s} + y[x_*(1-x-y) - xz_*] + ry(1-x-y)(y_* - y) = 0. \quad (40)$$

Інформаційним системам притаманна наявність *перемішаного шару*. Він створюється, коли в системі виникає хаотичний режим, який змінюється відмінним від вихідного впорядкованим режимом. Наявність перемішаного (проміжного між хаотичним і впорядкованим режимами) шару є необхідною умовою генерації інформації і розвитку взагалі. Такий шар мають усі процеси, де створюється інформація: біологічна еволюція, еволюція суспільства, розвиток живого організму тощо. Це область фазового простору, де всі траєкторії, що виходять із області початкових умов, потрапляють до перемішаного шару.

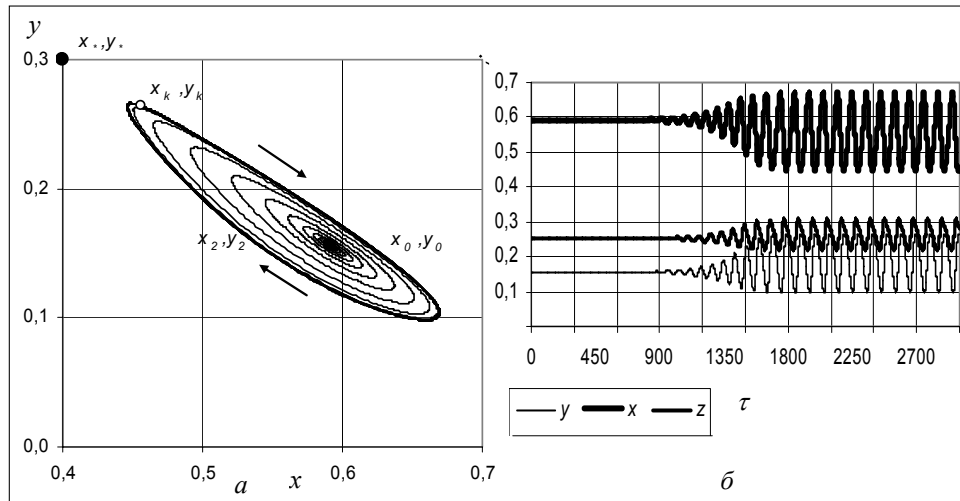


Рис. 6. Самозбудження граничного циклу: *a* — фазовий портрет, *b* — перехідний процес

У середині перемішаного шару поведінка системи хаотична, система нестійка, можливість прогнозування обмежена, але всі траєкторії виходять із нього і потрапляють у динамічний мультистаціонарний стан. Саме цим перемішаний шар відрізняється від химерного атрактора [2]. Йому можна дати назву *хаос*, бо він має ознаки і хаосу, і порядку. На рис. 7 наведено приклад такого стаціонарного просторового розподілу, де траєкторії мають хаотичний характер, за умови  $b = -1,376$ ;  $r = -1$ ;  $d = 0,001$ ;  $m = 0,01$ ;  $x_* = 0,43$ ;

$y_* = 0,3$ ;  $x(0) = 0,28$ ;  $y(0) = 0,3$   $\left(\frac{dx}{ds}\right)_{s=0} = 0$ ;  $\left(\frac{dy}{ds}\right)_{s=0} = 0$ . На рис. 8 пока-

зано випадок паритетних граничних умов  $x(0) = y(0) = z(0) = x(1) = y(1) = z(1) = 1/3$ , коли на всьому просторі існує певна впорядкованість, за умови  $b = -1,818$ ;  $r = -0,9$ ;  $d = 0,001$ ;  $m = 0,01$ ;  $x_* = 0,31$ ;  $y_* = 0,31$ ;  $x(0) = 1/3$ ;

$y(0) = 1/3$ ;  $x(1) = 1/3$ ;  $y(1) = 1/3$ ;  $\left(\frac{dx}{ds}\right)_{s=0} = 0$ ;  $\left(\frac{dy}{ds}\right)_{s=0} = 0$ .

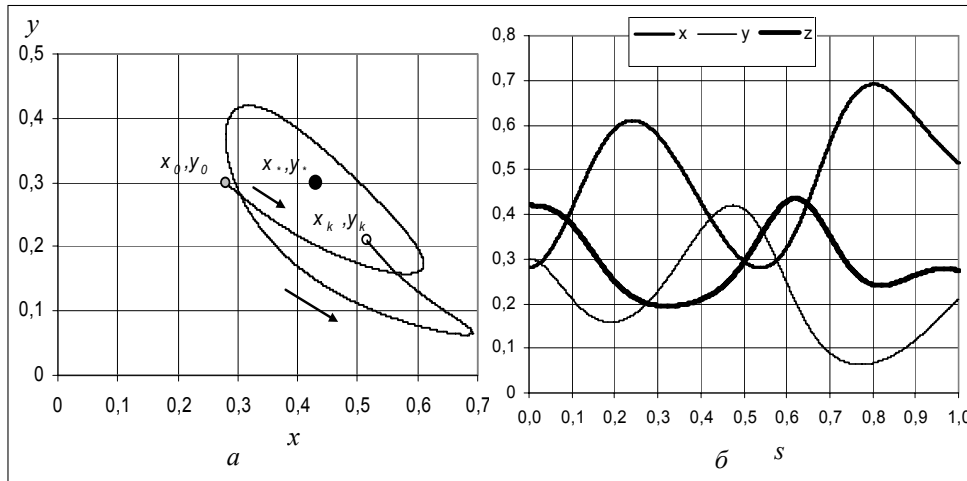


Рис. 7. Самозбудження граничного циклу: *a* — фазовий портрет, *б* — просторовий перехід

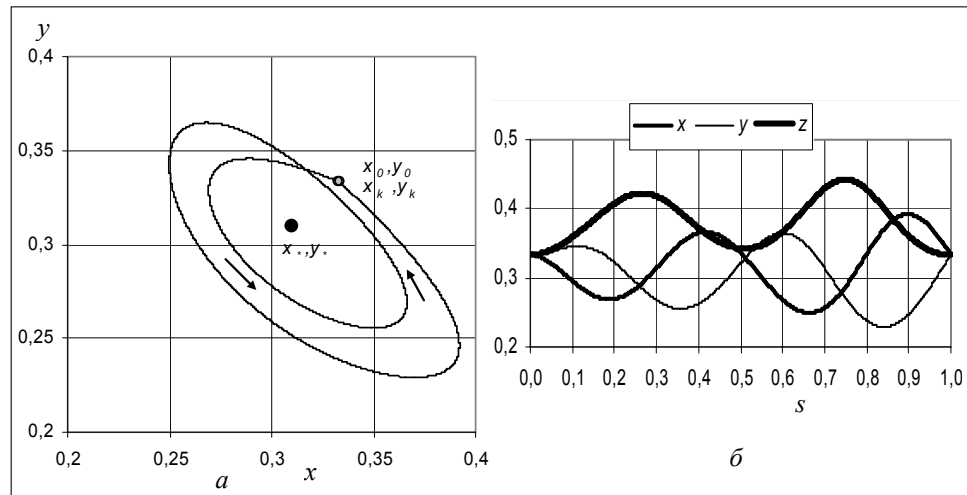


Рис. 8. Стационарний просторовий розподіл за паритетних граничних умов: *a* — фазовий портрет, *б* — просторовий перехід

### КОНКУРЕНЦІЯ ІНФОРМАЦІЙ

Розглянемо приклад використання системи (1)–(3) для одновимірного випадку

$$\frac{\partial x}{\partial \tau} = d \frac{\partial^2 x}{\partial s^2} - m \frac{\partial x}{\partial s} + x[yz_* - y_*(1-x-y)] + bx(1-x-y)(x_* - x); \quad (39)$$

$$\frac{\partial y}{\partial \tau} = d \frac{\partial^2 y}{\partial s^2} - m \frac{\partial y}{\partial s} + y[x_*(1-x-y) - xz_*] + ry(1-x-y)(y_* - y). \quad (40)$$

На рис. 9 показано результати розрахунків переходу від однорідного просторового розподілу носіїв *x*, *y*-ідей до стаціонарного неоднорідного розподілу з урахуванням дифузії, міграції та керування, за умови

$x(\tau,0) = y(\tau,0) = x(\tau,1) = y(\tau,1) = 1/3; x(0,s) = 1/3; y(0,s) = 1/3, b = -0,4; r = 0,2; d = 0,001; m = 0,01; x_* = 0,33; y_* = 0,33$ . Видно, що перехід відбувся в коливальному режимі. На рисунку наведено коливання змінних в центрі розподілу  $s = 0,5$ , де панує  $y$ -ідея.

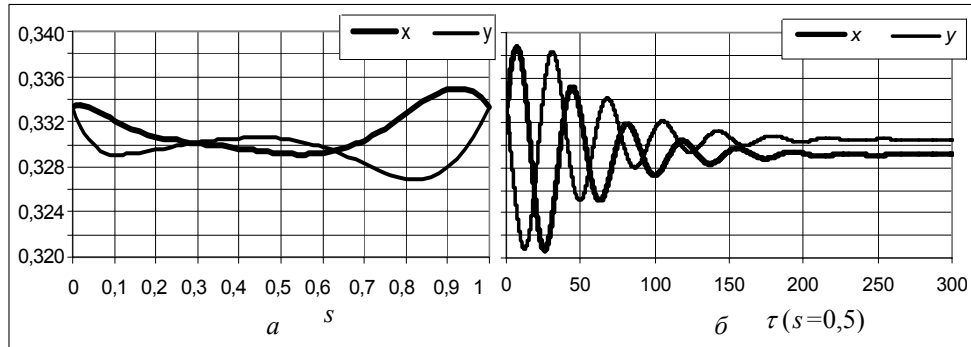


Рис. 9. Динаміка переходу до стаціонарного просторового розподілу за паритетних граничних умов:  $a$  — стаціонарний розподіл  $x(300,s); y(300,s)$ ,  $b$  — коливання всередині системи  $x(\tau; 0,5); y(\tau; 0,5)$

Для аналізу перехідного процесу скористаємося згорткою інформації шляхом кластеризації. Унікальні елементи, які не можна віднести до жодного кластеру, можуть бути ознакою новизни. При цьому треба мати на увазі, що універсального критерія якості кластеризації не існує.

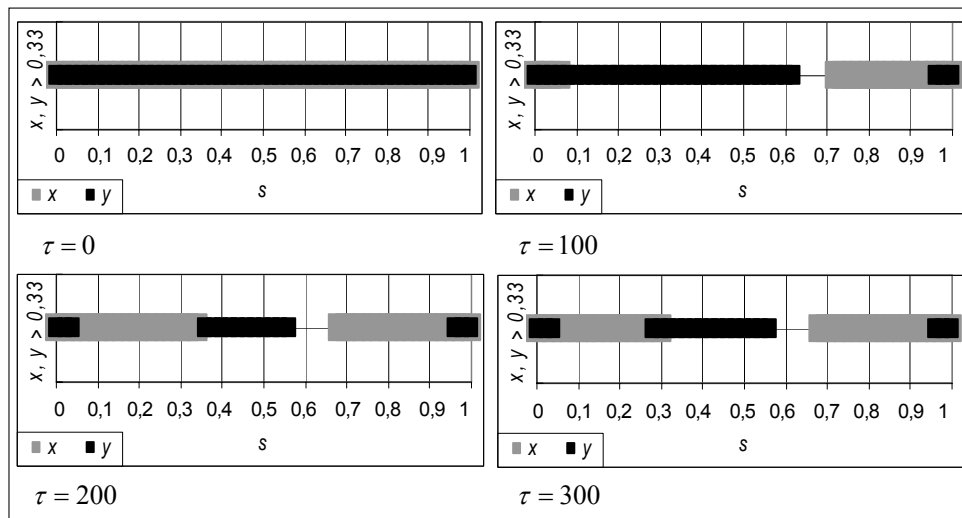


Рис. 10. Конкуренція ідей за ознакою  $x, y > 0,33$  згідно із рис. 9

На рис. 10 згідно з рис. 9 наведено часові зміни просторової структуризації за ознакою подолання бар'єра « $x, y > 0,33$ ». На початку процесу  $\tau = 0$  існує ідейна єдність, тобто співіснування прихильників  $x, y$ -ідей на всьому просторі  $0 < s < 1$ . У момент  $\tau = 100$  з'являються по дві підобласті прихильників цих ідей. В момент  $\tau = 200$  створюються три підобласті прихильників  $y$ -ідеї. У момент  $\tau = 300$  згідно з рис. 9 система виходить на стаціонарний неоднорідний розподіл, де в центральній частині домінують прихильни-

ки  $y$ -ідеї, а в околі границь системи спостерігається співіснування прихильників обох ідей. У результаті конкуренції ідей між центром і границями самовільно склався « $x$ -пояс». Зауважимо, що причиною перетину підобластей є однакові на всьому просторі параметри дифузії та міграції  $d, m$ . У разі існування на межах підобластей занижених параметрів дифузії та міграції спостерігається більш чітка кластеризація інформаційного простору.

На рис. 11 показано ситуацію «хаос» — перехід системи в просторі і в часі з початкового однорідного режиму з паритетними граничними умовами до хаотичного режиму з наступним поверненням до впорядкованого режиму, за умови  $x(\tau,0) = y(\tau,0) = x(\tau,1) = y(\tau,1) = 1/3$ ;  $x(0,s) = 1/3$ ;  $y(0,s) = 1/3$ .  $b = 1,2$ ;  $r = 1,6$ ;  $d = 0$ ;  $m = 0,0016$ ;  $x_* = 0,333$ ;  $y_* = 1/3$ . Таким чином, система демонструє адаптацію до «міграційного» збурення за відсутності дифузії. Наведено кластерний просторовий розподіл елементів системи за ознакою  $x, y > 1/3$  з метою з'ясувати, хто виграв конкуренцію за однакових стартових умов, але в режимі хаосу. Очевидно, що такого типу згортка інформації допомагає в аналізі ситуацій.

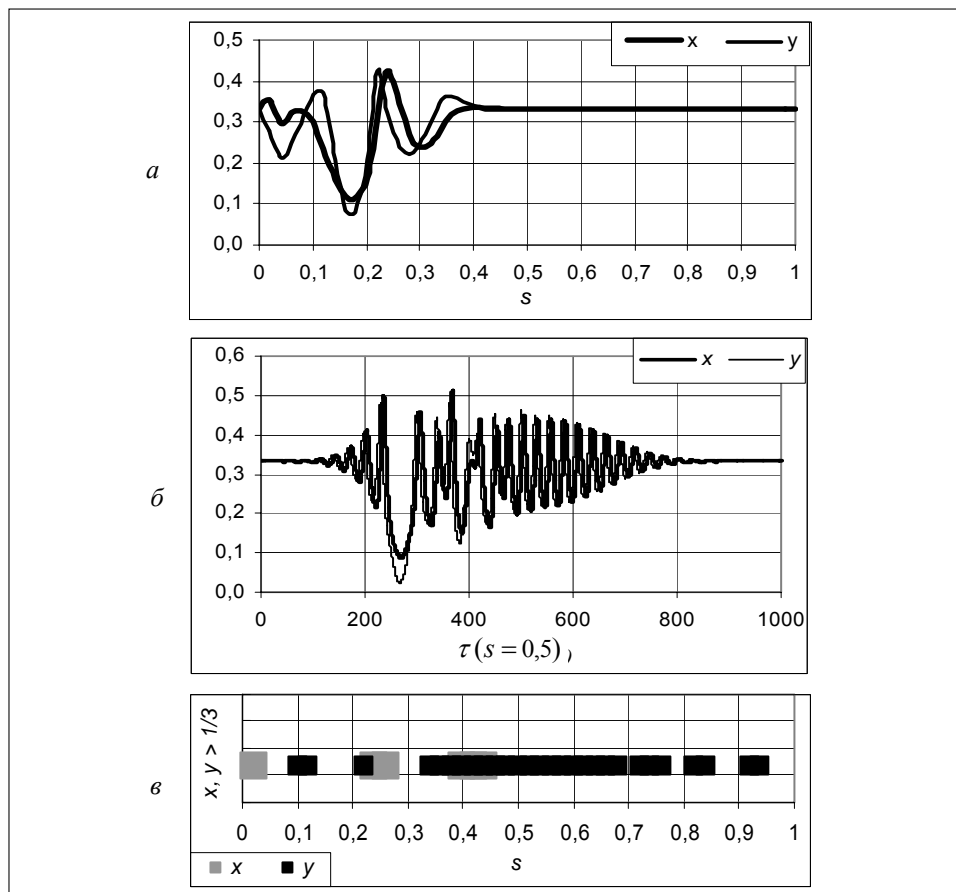


Рис. 11. Динаміка переходу до стаціонарного просторового розподілу за паритетних початкових і граничних умов:  $a$  — хаос у просторі,  $b$  — хаос у часі,  $c$  — розподіл переможців конкуренції

## **ВИСНОВКИ**

1. Універсальність сучасних інформаційних технологій і методів прийняття рішень спонукає до формування відповідних стереотипів мислення та поведінки. У таких умовах важливо мати власну інформаційну модель, яка враховує процеси взаємодії носіїв інформації, їх конкуренції, спілкування, міграції і сама є конкурентноздатною у боротьбі за інформаційні ресурси.

2. Симетричний варіант моделі (з однаковими параметрами) описує процес вибору, якщо апріорні переваги відсутні. За різних параметрів модель описує процес відбору, коли деякі з елементів мають переваги [2].

3. Модель можна використати для дослідження макроекономічних, соціальних, культурних, політичних та інших процесів, а також під час навчання.

4. Напрямок подальшого розвитку моделі уявляється як формування сукупності реальних просторових параметрів із різних суспільних проблем, що далеко не завжди є простою задачею.

## **ЛІТЕРАТУРА**

1. *Прангшивили И.В.* Энтропийные и другие системные закономерности: Вопросы управления сложными системами. — М.: Наука, 2003. — 428 с.
2. *Чернавский Д.С., Чернавская Н.М., Малков А.С., Малков С.Ю.* Борьба условных информационных // История и синергетика: Математическое моделирование социальной динамики. — М.: КомКнига, 2005. — С. 88–116.
3. *Повещенко Г.П.* Модель взаємовпливу популяції та довкілля: доповіді НАН України, 2001. — № 12.— С. 71–77.
4. *Повещенко Г.П.* Конкуренція ідей за умови паритету // Наукові вісті, 2008. — № 3. — С. 53–60.
5. *Пригожин И., Стенгерс И.* Порядок из хаоса. — М.: Прогресс, 1986. — 431 с.

*Надійшла 27.10.2009*

**О КОНЕЧНОМЕРНЫХ ГИПЕРКОМПЛЕКСНЫХ ЧИСЛОВЫХ  
СИСТЕМАХ — КАРДИНАЛЬНОМ РАЗВИТИИ ТЕОРИИ  
ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ В ИНФОРМАТИКЕ**

Представление данных — важнейший элемент создания информационных систем любого типа, так как это определяет скоростные, точностные, надежностные и другие характеристики, а также параметры функционирования системы. Это предопределило то, что сегодня можно перечислить многих ученых, которые на разных этапах творческой работы занимались и занимаются представлением данных и обработкой информации. К ним относятся академик НАН Украины А.А. Летичевский, академик НАН Украины А.В. Палагин, член-корреспондент НАН Украины Б.Н. Малиновский, член-корреспондент НАН Украины К.Г. Самофалов и многие другие. При этом очень ценными для нас являются высказывания академика В.М. Глушкова о работах предприятия, которым руководил академик С.П. Королев, по применению в механике важнейшей из гиперкомплексных числовых систем — кватернионов. По всей видимости, такой же точки зрения придерживался академик НАН Украины В.С. Михалевич, имевший очень высокое мнение о гиперкомплексных числовых системах (ГЧС) и их применениях.

На необходимость вернуться к вопросу представления и обработки данных повлияло появление книги «Конечномерные гиперкомплексные числовые системы. Основы теории. Применения» авторов М.В. Синькова, Ю.Е. Бояриновой, Я.А. Калиновского. Актуальность и своевременность выхода в свет этой книги чрезвычайно велика в связи с бурным ростом числа работ по информационным системам и все это неразрывно связано с позицией, которую занимали академик В.М. Глушков и академик НАН Украины В.С. Михалевич по данной проблеме.

Приятно отметить, что все три автора книги являются выпускниками разных лет Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт» и известны научной общественности как специалисты в области нетрадиционных методов представления и обработки данных в информатике. При этом не так много работ получают высшие награды за научные достижения. Так руководитель работ по проблеме гиперкомплексных систем счисления профессор М.В. Синьков был удостоен в 1991 году Государственной премии СССР, а за десять лет до этого — премии Президиума Национальной академии наук Украины имени С.А. Лебедева.

Работая в области теории чисел и теории сравнений, авторы изучили важнейшую фундаментальную теорему Гаусса об изоморфизмах в классе вещественных и комплексных вычетов. С этого момента, по сути, и началось вхождение в гиперкомплексную тематику. На первых этапах была проведена работа по построению аналогов фундаментальной теоремы Гаусса для большого количества многомерных или гиперкомплексных числовых систем. Все эти работы были представлены в книге М.В. Синькова и Н.М. Губарени под названием «Непозиционное представление многомерных числовых систем». Данная книга может считаться предвестником широких исследований в области гиперкомплексных числовых систем.

Результаты исследований, приведенные в новой книге, представлены по классическому принципу и содержат значительный теоретический материал, проиллюстрированный многочисленными примерами, а также тремя большими прикладными применениями.

Чтобы яснее представить роль ГЧС, вспомним, что появление комплексных чисел решило, в определенной мере, две крупные задачи. Первая из них состоит в переформулировке известных и решаемых задач на язык комплексных чисел и тем самым получением качественно новых результатов. Вторая задача состоит в построении таких проблем, которые ранее плохо решались в вещественных числах. Однако все это потребовало проведения глубоких теоретических исследований как базовых вопросов развития теории гиперкомплексных числовых систем, так и специализированных вопросов. К ним можно отнести проблему множественности ГЧС и исследование классов изоморфизмов. Задача «порождения» ГЧС или задача определения множественности ГЧС здесь выделена как одна из главнейших. Привлекает внимание также поиск таких изоморфных переходов, среди которых обязательно появятся слабозаполненные таблицы умножения. Такой изоморфный переход позволяет найти таблицу умножения, содержащую большое число нулей, что обеспечивает при расчетах повышение производительности.

Огромное внимание уделено как построению функций гиперкомплексного аргумента в различных гиперкомплексных числовых системах, так и исследованию аналитичности функций гиперкомплексного аргумента. Свое место нашли также нелинейности и, связанные с ними, возможности решения широкого класса практических задач. Предлагаются различные методы решения дифференциальных уравнений в ГЧС и иллюстрируются конкретными примерами.

Как говорилось выше, прикладные вопросы освещены тремя большими задачами. Первая из них включает исследования в области механики управления подвижными телами в пространстве. Данная задача, будучи переформулированной в терминах кватернионов, дала возможность получения результата со значительно лучшими характеристиками. Аналогично, существенные улучшения получаются во второй задаче — цифровой фильтрации. В ней в передаточной функции вещественные коэффициенты заменены гиперкомплексными, что принципиально повлияло на получаемые окончательные результаты. В третьей — криптографической задаче разделения секрета существенно улучшилась криптографическая стойкость с применением гиперкомплексных чисел и модулярной арифметики.

Значительная наукоемкая библиография показывает огромный интерес к этой тематике у нас в стране и за рубежом.

Резюмируя сказанное выше, можно сделать вывод, что рассматриваемая проблема и изложенный материал являются результатом фундаментальных научных исследований, которые выводят на совершенно новый уровень теорию представлений и обработки данных и принципиально по-новому формулируют передовые взгляды в информатике.

Данное научное направление является интересным и полезным как для научных работников, так и профессорско-преподавательского состава, многочисленных аспирантов и студентов как кардинальное развитие теории представления и обработки данных в информатике.

Ректор НТУУ «КПИ»,  
академик НАН Украины

М.З. Згуровский

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРИКЛАДНІ ПРОБЛЕМИ І  
МЕТОДИ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУTHEORETICAL AND APPLIED PROBLEMS AND  
METHODS OF SYSTEM ANALYSIS

УДК 681.3.06

**Відкрито-замкнені засади середовищ інтеграції. Частина I / Редько І.В.** // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2010. — № 4. — С. 7–17.

У рамках концепції ОС-system розглянуто поняття середовища інтеграції та інтеграційної системи. Розроблено універсальний метод еволюційного збагачення сутностей. Уведено поняття оракульного середовища інтеграції та дано класифікацію таких середовищ. Описано застосування методу еволюційного збагачення до сутностей типу бізнес-процесу в предметній області. Рис.: 4. Бібліогр.: 14 назв.

UDC 681.3.06

**Open-and-closed principles of integration environments. Part I / Redko I.V.** // System Research and Information Technologies. — 2010. — № 4. — P. 7–17.

The concepts of the integration environment and integration system are considered in the context of the OS-system conception. A universal method for evolutionary enrichment of essences is designed. The concept of a parametric integration environment is defined, and classification of such environments is constructed. The application of the method of evolutionary enrichment to the essences of the business process type in the subject field is described. Figs: 4. Refs: 14 titles.

УДК 303.833.7:504.75.05

**Зовнішні витрати від забруднення при виробництві електроенергії як індикатор стійких електрогенеруючих систем / Мацуки Й., Брондзя О., Маслюківська О.** // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2010. — № 4. — С. 18–32.

Застосовано підхід шляху впливу (Impact Pathway Approach) для визначення зовнішніх витрат виробництва електроенергії з викопних джерел в Україні. За допомогою комп'ютерної програми SimPact та методики опитування щодо бажання платити обраховано вартість зовнішніх витрат від впливу викидів теплоелектростанції на захворюваність та смертність населення на прикладі Трипільської ТЕС у м. Українка. На основі отриманих результатів було зроблено рекомендації щодо включення вартості зовнішніх ефектів до ціни електроенергії в Україні, отриманої за допомогою спалювання викопних енергоносіїв. Рис.: 1. Табл.: 10. Бібліогр.: 46 назв.

УДК 303.833.7:504.75.05

**Внешние издержки от загрязнения при производстве электроэнергии как индикатор устойчивых электрогенерирующих систем / Мацуки Й., Брондзя О., Маслюковская Е.** // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2010. — № 4. — С. 18–32.

Использован подход влияния (Impact Pathway Approach) для определения внешних издержек производства электроэнергии из ископаемых энергоресурсов в Украине. При помощи компьютерной модели SimPact и методики опроса желания платить были исчислены внешние издержки от влияния выбросов теплоэлектростанции на заболеваемость и смертность населения на примере Трипильской ТЭС в г. Украинка. На основе полученных результатов были сделаны рекомендации о внесении стоимости внешних издержек в цену электроэнергии в Украине, полученную в результате сжигания ископаемых энергоносителей. Рис.: 1. Табл.:10. Библиогр.: 46 назв.

ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ,  
ВИСОКОПРОДУКТИВНІ КОМП'ЮТЕРНІ  
СИСТЕМИPROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES,  
HIGH-EFFICIENCY COMPUTER SYSTEMS

УДК 574.4:633.2.033

**Адаптація технологій ролевого селевого аналізу «regular equivalence» и «regular role cologation» для построения трофических сетей пасторальных экосистем / Руденко С.С., Буждиган О.Я.** // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2010. — № 4. — С. 33–46.

Обосновано использование ролевого сетевого анализа в экологии и новое решение проблемы построения трофических сетей пасторальных экосистем на его основе. Адаптировано технологии регулярной эквиваленции и колорации для моделирования ролевых трофических сетей наземных экосистем пасторального типа с установлением биологической бессмы-



лицы. Представлены этапы осуществления ролевого сетевого анализа для построения полных и формализованных трофических сетей. Рис.: 9. Табл.: 1. Библиогр.: 19 назв.

UDC 574.4:633.2.033

**Adaptation of technologies of the role network analysis «regular equivalence» and «regular role coloration» to construction of pasture ecosystem trophic networks / Rudenko S.S., Buzdygan O.Ja.** // System Research and Information Technologies. — 2010. — № 4. — P. 33–46.

The use of network role analysis in ecology is grounded, and a new solution to the problem of construction of pasture ecosystem trophic networks on its basis is presented. The technologies of regular equivalence and coloration are adapted to modeling of role trophic networks without biological nonsense for terrestrial ecosystems of the pastoral type. The stages of realizing the role network analysis in the construction of complete and formalized trophic networks are presented. Figs: 9. Tabl.: 1. Refs: 19 titles.

---

УДК 519.854.2

**Багатоцільова модель змішаного цілочислового програмування для побудови і оптимізації багатошарової мережі поставок / Паксой Т., Оцейлан Е., Вебер Г.-В.** // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2010. — № 4. — С. 47–57.

Застосовується змішане лінійне цілочислове програмування до побудови багатошарової мережі поставок (SCN) за допомогою оптимізації перевезень і розподілу в SCN. Запропонована модель дозволяє враховувати багато задач SCN за допомогою розгляду загальних витрат на транспортування і місткості всіх шарів. У модель включено три різні цільові функції: перша — мінімізує повні вартості перевезень між усіма шарами; друга — мінімізує витрати від збереження і вартості замовлення в центрах розподілу (DCs), а остання цільова функція мінімізує зайву і невикористану потужність заводів і DCs. Рис.: 3. Табл.: 7. Бібліогр.: 26 назв.

УДК 519.854.2

**Многоцелевая модель смешанного целочисленного программирования для построения и оптимизации многослойной сети поставок / Паксой Т., Оцейлан Е., Вебер Г.-В.** // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2010. — № 4. — С. 47–57.

Применяется смешанное линейное целочисленное программирование к построению многослойной сети поставок (SCN) посредством оптимизации перевозок и распределения в SCN. Предложенная модель позволяет учесть многие задачи SCN посредством рассмотрения общих затрат на транспортировку и емкостей всех слоев. В модель включены три различные целевые функции: первая — минимизирует полные стоимости перевозок между всеми слоями; вторая — минимизирует затраты от сохранения и стоимости заказа в центрах распределения (DCs), а последняя целевая функция минимизирует излишнюю и неиспользованную способность заводов и DCs. Рис.: 3. Табл.: 7. Библиогр.: 26 назв.

---

УДК 004.04

**Інструментарій мінімізації ризику захищеності в розподілених комп'ютерних системах / Мухін В.Є.** // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2010. — № 4. — С. 58–68.

Розроблено структуру засобів мінімізації ризику захищеності розподілених комп'ютерних систем, виконано формалізацію функціонування основних блоків запропонованої структури. Запропоновано оцінку рівня загроз безпеки, інтегральну оцінку збитку внаслідок атак на вразливості, а також оцінку ступеня ризику реалізації загроз безпеки в комп'ютерних системах. Також запропоновано підхід до аналізу ризику на основі оцінок ступеня небезпеки факторів загроз безпеки та ймовірності реалізації загроз безпеки з розділенням їх на відповідні групи, а також на основі побудови спеціальної матриці ризиків захищеності для мінімізації ризику захищеності. Рис.: 3. Бібліогр.: 10 назв.

UDC 004.04

**Means for security risk minimization in distributed computer systems / Mukhin V.Ye.** // System Research and Information Technologies. — 2010. — № 4. — P. 58–68.

The structure of means for security risk minimization in distributed computer systems is developed, and the functioning of the basic blocks of the suggested structure is formalized. Also, estimation of the security threat level, the integrated assessment of the damage due to attacks on the vulnerabilities, and the risk assessment for the security threat realization are proposed. An approach to the risk analysis on the basis of estimation of the danger level of safety threat factors and the probability of safety threat realization with division of the factors into related groups is suggested, which is also based on the constructed special security risk matrix for security risk minimization. Figs: 3. Refs: 10 titles.

УДК 519.24/.857.3

**Теория принятия решений в задачах оптимальной остановки / Андреев Н.В.** // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2010. — № 4. — С. 69–78.

Рассмотрено правило оптимальных решений производителя с возрастающим запасом в данный период, когда заданы текущая цена и вероятностное распределение цен последующего периода. Построены модели принятия решений в задачах оптимальной остановки марковских последовательностей с детерминированной или случайной переоценкой. Приведено байесовскую процедуру принятия решений в задаче проверки статистических гипотез. Библиогр.: 16 назв.

UDC 519.24/.857.3

**Decision making theory in optimal stopping problems / Andreev N.V.** // System Research and Information Technologies. — 2010. — № 4. — P. 69–78.

An optimal decision making rule for a producer with growing inventory in the given period and specified the current price and probabilistic price distribution in the following period is given. Decision making models in optimal stopping problems of the Markov sequences with deterministic or stochastic revalue are constructed. The Bayesian decision making procedure in a statistical hypotheses testing problem is performed. Refs: 16 titles.

---

УДК 519.8

**Оптимальное распределение гидроресурсов в оросительных системах сетевой структуры / Кирик Е.Е., Остапенко В.В.** // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2010. — № 4. — С. 79–90.

Создана математическая модель транспортировки и распределения ресурсов с обобщенным законом сохранения. Для этой оптимизационной задачи удержания потоков в определенных пределах построены алгоритмы, базирующиеся на эффективных методах нелинейного программирования. Предложен подход, который дает возможность решать задачи распределения потоков с разнотипными нелинейными целевыми функциями для сетей с произвольным количеством замкнутых циклов. Библиогр.: 9 назв.

UDC 519.8

**Optimal hydroresources distribution in network-structured irrigation systems / Kirik O.E., Ostapenko V.V.** // System Research and Information Technologies. — 2010. — № 4. — P. 79–90.

A mathematical model of transportation and distribution of resources with a generalized conservation law is created. For this optimization problem of flow retention within the given limits, algorithms for efficient nonlinear programming are developed. The proposed approach gives the opportunity to solve problems of flow distribution with multitype nonlinear objective functions for networks with any number of closed loops. Refs: 9 titles.

---

УДК 681.513.675

**Управление односторонними процессами фильтрации вязкой нефти при наличии предельного градиента давления / Жданова И.В., Новиков А.Н.** // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2010. — № 4. — С. 91–99.

Предложен алгоритм управления односторонним процессом с многозначным препятствием в области. Модель процесса представлена в виде вариационного неравенства с негладким функционалом соответствия. Алгоритм применен к задаче управления процессом фильтрации нефти в условиях наличия предельного градиента давления. Рис.: 4. Библиогр.: 7 назв.

UDC 681.513.675

**Control of one-sided viscous oil filtration process under conditions of limited pressure gradient / Zhdanova I.V., Novikov O.M.** // System Research and Information Technologies. — 2010. — № 4. — P. 91–99.

A control algorithm for an one-sided process with a multivalued obstacle is proposed. The model of the process is represented in the variational inequality form with a nonsmooth functional of accordance. The algorithm is applied to the oil filtration control problem with a limited pressure gradient. Figs: 4. Refs: 7 titles.

---

УДК 519.713: 631.411.6

**Практическая реализация концепции корпоративной экологической системы для интегральной оценки экологического риска здоровью / Козуля Т.В., Шаронова Н.В.** // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2010. — № 4. — С. 100–109.

Рассмотрены теоретико-практические основы необходимости и целесообразности введения в систему принятия управленческого решений концепции корпоративной экологической системы (КЭС). Определены математические подходы к определению взаимодействий между составными КЭС и установление риска нарушений в результате возникновения отрицательного фактора влияния, внедрение оценки риска здоровью как критерия опасности социально-экономической системы. Представлен алгоритм определения состояния КЭС на основе оценки риска. Рис.: 5. Табл.: 1. Библиогр.: 12 назв.

UDC 519.713: 631.411.6

**Practical realization of the corporative ecological system concept for integral estimation of ecological health risk / Kozulia T.V., Sharonova N.V.** // System Research and Information Technologies. — 2010. — № 4. — P. 100–109.

Practical and theoretical fundamentals for the necessity and advisability of introduction of the corporative ecological system (CES) into the decision making system are prescuted. Mathematical approaches are defined to the determination, of interactions between the CES components, the ascertainment of breaking risk from the appearance of negative influence factor, and the introduction of health risk estimation as a danger criterion of a socioeconomic system. An algorithm of the CES state determination on the basis of health risk estimation is presented. Figs: 5. Tabl.: 1. Refs: 12 titles.

---

**ПРОБЛЕМНО І ФУНКЦІОНАЛЬНО ОРІЄНТОВАНІ  
КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ ТА МЕРЕЖИ**

**PROBLEM- AND FUNCTION-ORIENTED  
COMPUTER SYSTEMS AND NETWORKS**

УДК 004.415.53

**Пріоритизація тестів як метод швидкого виявлення серйозних помилок / Малишевський О.Г.** // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2010. — № 4. — С. 110–128.

Розглянуто використання інформації про вартість тестів і серйозність помилок у процесі пріоритизації у регресивному тестуванні. Описано способи оцінювання вартості тестів та серйозності помилок. Розглянуто серйозність помилок із точки зору надійності програми. Досліджено три методи впровадження інформації про вартість та критичність тестів у процес пріоритизації. Досліджено вплив шкали вартості тестів та серйозності помилок на ефективність методів пріоритизації. Рис.:13. Бібліогр.: 23 назви.

UDC 004.415.53

**Prioritization of tests as a method for fast detection of faults / Malishevsky A.G.** // System Research and Information Technologies. — 2010. — № 4. — P. 110–128.

The use of information on the test costs and fault severities in the prioritization process in a regression testing is considered. Methods for estimation of test costs and fault severities are described. Fault severity is explored in relation to the program reliability. Three methods for incorporating the information into the prioritization process are investigated. The effects of the scale of test cost and fault severities on the efficiency of the methods for prioritization is established. Figs: 13. Refs: 23 titles.

---

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

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

УДК 581.52

**Элементы информационной динамики / Повещенко Г.П.** // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2010. — № 4. — С. 129–141.

Приведена математическая модель информационной динамики учитывающая влияние процессов миграции и диффузии носителей информации, общения между ними и внешнее влияние на процессы выбора и отбора. Расчеты по модели демонстрируют наличие в системе явлений мультистабильности, устойчивости выбора, хаотических и переходных режимов. Рис.: 11. Библиогр.: 5 назв.

UDC 581.52

**Elements of information dynamics / Poveshchenko G.P.** // System Research and Information Technologies. — 2010. — № 4. — P. 129–141.

The examined mathematical model of information dynamics takes into account the influence of processes of migration and diffusion of data carriers, intercourses between them, and external influence on the processes of choice and selection. The calculations according to the model demonstrate the presence of multistability, stability of choice, chaotic and transient regimes in the system. Figs: 11. Refs: 5 titles.

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

**Андрєєв Микола Варфоломійович,**

доктор фізико-математичних наук, провідний науковий співробітник Навчально-наукового комплексу «Інститут прикладного системного аналізу» НТУУ «КПІ» МОН та НАН України, Київ

**Брондзя Ольга Олегівна,**

магістр екології Національного університету «Києво-Могилянська академія», Україна, Київ

**Буждиган Оксана Ярославівна,**

кандидат біологічних наук, асистент кафедри екології та біомоніторингу Чернівецького національного університету ім. Юрія Федьковича, Україна, Чернівці

**Вебер Герхард-Вільгельм,**

професор Інституту прикладної математики Середньосхідного технічного університету, Турція, Анкара

**Жданова Ірина Валеріївна,**

кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційної безпеки Фізико-технічного інституту Національного технічного університету України «КПІ», Київ

**Кірік Олена Євстафіївна,**

старший науковий співробітник, кандидат фізико-математичних наук, вчений секретар 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

**Малишевський Олексій Григорович,**

доктор філософії, старший науковий співробітник Навчально-наукового комплексу «Інститут прикладного системного аналізу» НТУУ «КПІ» МОН та НАН України, Київ

**Маслюківська Олена Павлівна,**

старший викладач кафедри екології Національного університету «Києво-Могилянська академія», Україна, Київ

**Мацукі Йошіо,**

доктор наук, професор кафедри математичних методів системного аналізу Навчально-наукового комплексу «Інститут прикладного системного аналізу» НТУУ «КПІ» МОН та НАН України «КПІ» України, Київ

**Мухін Вадим Євгенійович,**

доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри обчислювальної техніки факультету інформатики та обчислювальної техніки Національного технічного університету України «КПІ», Київ

**Новіков Олексій Миколайович,**

професор, доктор технічних наук, директор Фізико-технічного інституту Національного технічного університету України «КПІ», Київ

**Остапенко Валентин Володимирович,**

професор, доктор фізико-математичних наук, завідувач відділу Навчально-наукового комплексу «Інститут прикладного системного аналізу» НТУУ «КПІ» МОН та НАН України, Київ

**Оцейлан Ерен,**

кандидат наук, дослідник університету Сельчук, Турція, Конья

**Паксой Туран,**

кандидат наук, доцент університету Сельчук, Турція, Конья

**Повещенко Генадій Павлович,**

старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Навчально-наукового комплексу «Інститут прикладного системного аналізу» НТУУ «КПІ» МОН та НАН України, Київ

**Редько Ігор Володимирович,**

доктор фізико-математичних наук, професор факультету електроніки Національного технічного університету України «КПІ», Київ

**Руденко Світлана Степанівна,**

професор, доктор біологічних наук, професор кафедри екології та біомоніторингу Чернівецького національного університету ім. Юрія Федьковича, Україна, Чернівці

**Шаронова Наталія Валеріївна,**

професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри інтелектуальних комп'ютерних систем Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Україна, Харків

Зміст журналу  
«Системні дослідження та інформаційні технології»  
за 2010 р.

**ЗМІСТ № 1**

<i>Згуровский М.З., Павлов А.А., Штанькевич А.С.</i> Модифицированный метод анализа иерархий .....	7
<i>Згуровський М.З., Петренко А.І.</i> Е-наука на шляху до семантичного Грід. Частина 1: Об'єднання Web- і Грід-технологій .....	26
<i>Карпенко Д.М., Свістунів С.Я.</i> Методика оцінки завантаженості Grid-середовища НАН України .....	39
<i>Погорілий С.Д., Мар'яновський В.А., Бойко Ю.В., Вітель Д.Ю.</i> Формування узагальнених паралельних схем алгоритму Флойда-Уоршала .....	52
<i>Рзаев Р.Р.</i> Государственное регулирование региональным развитием на базе современных информационных технологий .....	69
<i>Иваненко В.И., Михалевич В.М.</i> К моделированию стохастических ситуаций принятия решения .....	78
<i>Радюк А.Н.</i> Системное оценивание функционирования сложных технических систем ....	81
<i>Chroszcz H.</i> The change strategy for a mining company .....	95
<i>Макаренко О.С., Крушинський Д.А.</i> Моделювання руху пішоходів на основі клітинних автоматів .....	100
<i>Романенко В.Д., Реутов А.А.</i> Синтез функций прогнозирования динамических процессов для моделей в пространстве состояний на основе диофантовых уравнений .....	110
<i>Зражевський О.Г.</i> Методи побудови моделей для довгострокового прогнозування фінансових часових рядів .....	123
Реферати .....	143
Відомості про авторів .....	148
Оптимізація та інтелектуальні комп'ютерні технології як базові елементи науково-технічного прогресу .....	150

**ЗМІСТ № 2**

<i>Згуровський М.З., Петренко А.І.</i> Е-наука на шляху до семантичного Грід. Частина 2: Семантичний Web- і семантичний Грід .....	7
<i>Шпортко О.В.</i> Стиснення RGB-зображень без втрат із використанням палітри ....	26
<i>Зайченко Ю.П.</i> Оценка кредитных банковских рисков с использованием нечеткой логики .....	37
<i>Федин С.С.</i> Прогнозирование и вероятностная оценка долговечности технических объектов .....	55
<i>Мальшевская Е.Н.</i> Анализ использования нейросетей для диагностики рака шейки матки по мультиспектральному изображению .....	64
<i>Крапухина Н.В., Проничкин С.В., Рыков А.С.</i> Формирование подгрупп экспертов с согласованными мнениями и определение групповой обобщенной оценки многопризнаковых объектов .....	72
<i>Филатов А.Г.</i> Синтез регулятора состояния для дискретной во времени системы модального управления .....	80
<i>Zhuk S.</i> Minimax recursive state estimation for linear discrete-time descriptor systems.....	94
<i>Песчанский А.И.</i> Календарное техническое обслуживание простой системы с учетом минимального аварийного восстановления .....	106
<i>Угрюмова Е.М., Трончук А.А., Афанасьевская В.Е.</i> Информационная технология формирования облика элементов технических систем на основе дискретных данных об аналогах .....	118
<i>Сявакко М.С., Пасічник Т.В., Тимків В.П.</i> Нечітка арифметика в задачах міжгалузевого балансу .....	134
Реферати .....	144
Відомості про авторів .....	149

### ЗМІСТ № 3

<i>Недашкова Н.И.</i> Многокритериальное принятие решений с использованием максиминного синтеза в методе анализа иерархий (МАИ) .....	7
<i>Буценко Ю.П., Савченко Ю.Г.</i> Оперативный контроль вычислений на основе информационной избыточности .....	17
<i>Панченко Б.Е., Писанко И.Н.</i> О полноте и единственности универсального каркаса в реляционной модели данных .....	25
<i>Сундучков К.С.</i> Оптимизация фрагмента телекоммуникационной сети .....	36
<i>Ляхов С.О., Виклюк Я.І.</i> Метод визначення потоків рекреантів за допомогою модифікованої гравітаційної моделі на базі нечіткої логіки .....	46
<i>Мурга Н.А.</i> Нечеткий фондовый портфель. Исследование и оптимизация .....	60
<i>Поворознюк А.І.</i> Синтез комбінованого вирішального правила (ВП) у комп'ютерних системах медичної діагностики .....	72
<i>Серая О.В., Демин Д.А.</i> Оценка представительности усеченных ортогональных подпланов плана полного факторного эксперимента .....	84
<i>Згуровський О.М.</i> Дослідження переривистого характеру глобалізації в контексті суспільного розвитку та безпеки країн світу. Частина 2. Дослідження впливу кризових явищ 2008–2009 років .....	89
<i>Москалева Е.В.</i> Математическая модель расчета термонапряженного состояния оболочечных конструктивных элементов .....	108
<i>Остапенко В.В., Якунина И.Л.</i> Функция Минковского в задачах упаковки .....	115
<i>Oganesyan G.</i> Price formation mechanism and tariff protection in a dynamic model of a small open economy in transition .....	122
<i>Скобелев В.В.</i> Анализа free-running автомата над конечным кольцом .....	130
Реферати .....	143
Відомості про авторів .....	149

### ЗМІСТ № 4

<i>Редько И.В.</i> Открыто-замкнутые основания сред интеграции. Часть I .....	7
<i>Matsuki Y., Brondzia O., Maslukivska O.</i> External cost as an indicator for sustainable electricity generation system .....	18
<i>Руденко С.С., Буждиган О.Я.</i> Адаптація технологій рольового мережевого аналізу «regular equivalence» та «regular role coloration» для побудови трофічних мереж пасторальних екосистем .....	33
<i>Paksoy T., Özceylan E., Weber G.-W.</i> A multi-objective mixed integer programming model for multi echelon supply chain network design and optimization .....	47
<i>Мухин В.Е.</i> Инструментарий минимизации риска защищенности в распределенных системах (РКС) .....	58
<i>Андреев М.В.</i> Теорія прийняття рішень у задачах оптимальної зупинки .....	69
<i>Кірік О.Є., Остапенко В.В.</i> Оптимальний розподіл гідроресурсів у зрошувальних системах мережевої структури .....	79
<i>Жданова І.В., Новіков О.М.</i> Керування односторонніми процесами фільтрації в'язких нафт за наявності граничного градієнта тиску .....	91
<i>Козуля Т.В., Шаронова Н.В.</i> Практична реалізація концепції корпоративної екологічної системи для інтегральної оцінки екологічного ризику здоров'ю .....	100
<i>Мальшевский А.Г.</i> Приоритезация тестов как метод быстрого выявления серьезных ошибок .....	110
<i>Повещенко Г.П.</i> Елементи інформаційної динаміки .....	129
<i>О конечномерных гиперкомплексных числовых системах — кардинальном развитии теории представления и обработки данных в информатике .....</i>	142
Реферати .....	144
Відомості про авторів .....	148
Зміст журналу «Системні дослідження та інформаційні технології» за 2010 р. ....	149
Автори статей за 2010 р. ....	150