

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ**  
**ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ**  
**І ГЛОБАЛЬНОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО ПРОСТОРУ**  
**ІНСТИТУТ КІБЕРНЕТИКИ ім. В.М. ГЛУШКОВА**  
**ІНСТИТУТ ЕКОНОМІКИ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ**

# **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ЕКОНОМІЦІ**

№ 4 (17), жовтень-грудень 2019 р.

**Міжнародний науковий журнал**

Заснований у липні 2014 р.  
Виходить 4 рази на рік

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України,  
в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових  
ступенів доктора і кандидата наук за напрямом фізико-математичні, технічні та  
економічні науки

(Наказ Міністерства освіти і науки України від 09.03.2016. № 241)

Свідоцтво про реєстрацію журналу КВ № 20259-10659 Р від 14.07.2014

**КИЇВ 2019**

## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

*Головний редактор* – **С.О. Довгий**, д-р фіз.-мат. наук, акад. НАНУ

*Заступник головного редактора* – **О.М. Трофимчук**, д-р техн. наук,  
чл.-кор. НАНУ

*Відповідальний секретар* – **Д.В. Стефанишин**, д-р техн. наук

### Члени редколегії:

**К.А. Андрющенко**, д-р екон. наук

**В.М. Гесць**, д-р екон. наук, акад. НАНУ

**В.М. Горбачук**, д-р техн. наук

**Л.Ф. Гуляницький**, д-р техн. наук

**Ю.І. Калюх**, д-р техн. наук

**С.І. Левицький**, д-р екон. наук

**О.О. Любіч**, д-р екон. наук

**В.Б. Мокін**, д-р техн. наук

**О.В. Мороз**, д-р екон. наук,

**В.О. Романов**, д-р техн. наук

**В.А. Пепеляєв**, д-р фіз.-мат. наук

**В.О. Петрухін**, д-р техн. наук

**С.К. Полумієнко**, д-р фіз.-мат. наук

**О.Г. Рогожин**, д-р екон. наук

**І.В. Сергієнко**, д-р фіз.-мат. наук,

акад. НАНУ

**М.І. Скрипниченко**, д-р екон. наук,

чл.-кор. НАНУ

**П.І. Стецюк**, д-р фіз.-мат. наук

**В.О. Устименко**, д-р фіз.-мат. наук

## МІЖНАРОДНА РЕДАКЦІЙНА РАДА

**О.М. Ведута**, д-р екон. наук, проф., РФ

**М. Вохозка**, проф., Чеська Республіка

**Р. Еспехо**, проф., Великобританія

**А. Крайка**, проф., Польща

**А. Леонард**, проф., Канада

**П. Миколайчак**, проф., Польща

**Є.О. Нурмінський**, д-р фіз.-мат. наук,

проф., РФ

**В.М. Полтерович**, д-р екон. наук, проф.,

акад. РАН, РФ

**П. Ткаліч**, старш. дослідник, Сінгапур

**Ю.С. Харін**, д-р фіз.-мат. наук, проф.,

чл.-кор. НАНБ, Білорусь

**Г. Ширз**, проф., Великобританія

**М. Ячимович**, проф., акад. ЧАНМ,

Чорногорія

---

Рекомендовано до друку Вченою радою Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України (протокол № 15 від 19.12.2019 р.)

*Журнал публікує оригінальні та оглядові статті, матеріали проблемного та дискусійного характеру, науково-практичні матеріали з питань математичного моделювання в різних сферах господарювання, інформаційного забезпечення процесу моделювання і прогнозування, розвитку кібернетичної складової і застосування сучасних програмно-апаратних засобів для математичного моделювання.*

## ОСНОВНІ ТЕМАТИЧНІ РОЗДІЛИ ЖУРНАЛУ

- Інформаційні технології в економіці
  - Математичні та інформаційні моделі в економіці
  - Аналіз, оцінка та прогнозування в економіці
  - Дискусійні повідомлення
-

## ЗМІСТ

### ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЕКОНОМІЦІ

**Горлинський Б. В., Зайцев С. В.**

Метод підготовки первинної інформації для адаптивних безпроводових засобів передачі даних..... 5

**Захожай О. І.**

Ситуаційно-подійна модель гібридного розпізнавання образів для обробки неоднорідних даних в складних системах..... 16

### МАТЕМАТИЧНІ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ МОДЕЛІ В ЕКОНОМІЦІ

**Тихонов Ю. Л., Полумієнко С. К.**

Індикатори та індекси рівня розвитку освіти..... 26

**Азаров С. І., Сидоренко В. Л., Задунай О.С.**

Природно-ресурсний потенціал сталого розвитку України як нелінійна динамічна система..... 41

**Тулякова Н.О., Трофимчук О.М.**

Математичні методи рентгенівської комп'ютерної томографії ..... 50

### АНАЛІЗ, ОЦІНКА ТА ПРОГНОЗУВАННЯ В ЕКОНОМІЦІ

**Ляшенко І. О., Стефанцев С. С., Шемаєв В. М.**

Модель ситуації у функціональній системі когнітивного поля..... 67

**Стефанишин Д. В.**

Підхід до прогнозування на основі даних моніторингу за допомогою комбінованого ситуаційно-індуктивного моделювання (основна ідея та очікувані результати)..... 75

**Татарченко Є. С., Лифар В. О.**

Оцінка стану та визначення показників ризику ІТ компаній при злиттях та поглинаннях..... 88

**Дробязко А. А., Дунаєв Б. Б., Любіч А. А.**

Моделювання монетарного регулювання відтворення економіки..... 99

### ДИСКУСІЙНІ ПОВІДОМЛЕННЯ

**Бекетов М. М.**

Математична та Просторова модель Періодичного закону хімічних елементів..... 118

**РЕФЕРАТИ..... 125**

**ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ..... 132**

## CONTENTS

### INFORMATION TECHNOLOGY IN ECONOMY

**Horlynskyi B. V., Zaitsev S. V.**

Method of preparing primary information for adaptive wireless data transmission device..... 5

**Zakhozhay O. I.**

Situational-event model of the hybrid patterns recognition for heterogeneous data processing in complex systems..... 16

### MATHEMATICAL AND INFORMATIONAL MODELS IN ECONOMY

**Tikhonov Y. L., Polumienko S. K.**

Indicators and indices of the level of education development..... 26

**Azarov S. I., Sydorenko V. L., Zadunaj O. S.**

Natural resource potential of Ukraine sustainable development as an nonlinear dynamic system..... 41

**Tulyakova N., Trofymchuk O.**

Mathematical Methods of X-ray Computed Tomography..... 50

### ANALYSIS, EVALUATION AND FORECASTING IN ECONOMY

**Liashenko I. A., Stefantsev S. S., Shemaiev V. M.**

Situational model in a functional system of cognitive field..... 67

**Stefanyshyn D. V.**

An approach to predicting based on monitoring data by means of combined situational-inductive modeling (the main idea and expected results)..... 75

**Tatarchenko E. S., Lyfar V. O.**

Assessment of the status and determination of risk indicators of IT companies in mergers and acquisitions..... 88

**Drobyazko A. A., Dunaev B. B., Lyubich A. A.**

Modeling of monetary regulation of reproduction of economy..... 99

### DISCUSSION'S

**Beketov M. M.**

Mathematical and Spatial Model of the Periodic Law of Chemical Elements..... 118

**ABSTRACTS**..... 125

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**..... 132

# ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЕКОНОМІЦІ

УДК 621.391

<http://orcid.org/0000-0002-9993-2427>

<http://orcid.org/0000-0001-6643-917X>

**Б. В. ГОРЛИНСЬКИЙ, С. В. ЗАЙЦЕВ**

## МЕТОД ПІДГОТОВКИ ПЕРВИННОЇ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ АДАПТИВНИХ БЕЗПРОВОДОВИХ ЗАСОБІВ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ

***Анотація.** Запропоновано метод підготовки первинної інформації для адаптивних безпроводових засобів передачі даних для забезпечення заданих показників достовірності інформації та підвищення їх ефективності.*

***Ключові слова:** достовірність інформації, безпроводові засоби передачі даних, завадостійкі коди, турбо код, адаптація, алгоритми декодування, завади.*

**DOI: 10.35350/2409-8876-2019-17-4-5-15**

### Вступ

Безпроводові засоби передачі даних (БЗПД) забезпечують обмін даними між абонентами, що можуть виконувати єдине завдання в умовах активного радіоелектронного впливу. Тому важливим показником, що характеризує ефективність функціонування таких БЗПД, є здатність забезпечувати задану достовірність прийому інформації в умовах впливу завад різного походження, у тому числі і навмисних, які характеризуються високою спектральною щільністю потужності. Ефективним напрямком протидії завадам є застосування в БЗПД технологій розширення спектра сигналу та кодових конструкцій.

### 1. Сучасні методи забезпечення достовірності інформації в БЗПД

На даний час методи забезпечення достовірності інформації в БЗПД досить глибоко й широко досліджені в наукових працях вітчизняних та іноземних авторів, серед яких найбільш відомі наступні вчені: А. Г. Зюко, Д. Д. Кловський, М. Л. Теплов, Л. М. Фінк, Л. Є. Варакін, В. Л. Банкет, В. В. Квашенников, В. І. Борисов, С. В. Зайцев, В. В. Казимир, К. Шеннон, Д. Форні, Ф. Дж. Мак-Вільямс, К. Берроу, Л. Хензо, А. Голдсміт, М. Валенті та ін. Зокрема, у роботах [1, 2] досліджуються схеми адаптації сигнально-кодових конструкцій (зміна позиційності сигналу та швидкості кодування завадостійкого коду) систем WiMax та LTE за первинними параметрами залежно від відношення сигнал-шум у каналі передачі. При цьому розглядаються канали з адитивним білим гаусівським шумом, Релеївськими

завмираннями, Райсовськими завмираннями та завмираннями Накагамі. В роботах інших авторів [3, 4] адаптація відбувається теж за рахунок зміни позиційності сигналу та швидкості кодування, але вже за вторинними параметрами – залежно від значень відношення сигнал-шум розраховуються значення ймовірності помилки для різних схем модуляцій сигналу та здійснюється порівняння цього значення з заданими, і залежно від результатів порівняння здійснюється вибір необхідної сигнально-кової конструкції. В підході [5] для забезпечення достовірності інформації вирішено застосовувати адаптацію. В роботі [6] запропоновано оптимізацію перемежувача в структурі турбо коду. У цьому випадку енергетичний вииграш відбувається при відношенні сигнал-завада в області “порога помилок” ТК.

Недоліком зазначених схем адаптації є те, що вони не враховують під час адаптації застосування різних завадостійких кодів, від більш простих до більш складних, в залежності від відношення сигнал-шум в каналі, що може призвести до спрощення варіантів синтезу моделей БЗПД, особливо за умов нестаціонарних навмисних завад.

## 2. Загальна постановка задачі, об’єкт, предмет та мета досліджень

Забезпечити задані показники достовірності інформації в БЗПД можна шляхом використання різних завадостійких кодів, від більш простих до більш складних, з урахуванням параметрів завад та використанням трьохкомпонентного турбо коду. Для цього пропонується розробити відповідний метод підготовки первинної інформації.

Таким чином, об’єктом досліджень є процеси формування і переробки кодованих даних у БЗПД, а предметом досліджень – методи забезпечення достовірності інформації у БЗПД. Мета досліджень – розробка методу підготовки первинної інформації для адаптивних БЗПД, що дозволить забезпечити задані показники достовірності інформації в БЗПД та підвищити їх ефективність.

## 3. Методика і результати досліджень

В [7] отримані точні аналітичні залежності для розрахунку ймовірності бітової помилки в каналі зв’язку з адитивним білим гаусівським шумом (АБГШ), фазовою модуляцією (ФМ-М), квадратурною амплітудною модуляцією (КАМ-М), розширенням спектра сигналу методом псевдовипадкової перестройки робочої частоти (ППРЧ) із врахуванням впливу навмисних завад, а також визначення оптимальної завади для розглянутих видів модуляцій сигналу. В якості навмисних завад розглядається шумова загороджувальна завада (ШЗЗ), шумова завада в частині смуги (ШЗЧС) та завада у відповідь (ЗВ). Точні формули ймовірності бітової помилки для модуляції ФМ-2, ФМ-4, ФМ-8, КАМ-16 відповідно при впливі ШЗЗ на систему радіозв’язку із ППРЧ мають вигляд:

– ФМ-2:

$$P_B = Q\left(\sqrt{2\left((h_0^2)^{-1} + (q)^{-1}\right)^{-1}}\right), \quad (1)$$

– ФМ-4:

$$P_B = Q \left( \sqrt{2 \left( (h_0^2)^{-1} + \left( \frac{q}{2} \right)^{-1} \right)^{-1}} \right), \quad (2)$$

– ФМ-8:

$$P_B = \frac{1}{3} \left( Q \left( \sqrt{\Lambda} \sin \frac{\pi}{8} \right) + Q \left( \sqrt{\Lambda} \sin \frac{3\pi}{8} \right) + 2 \left( T \left( \sqrt{\Lambda} \sin \frac{\pi}{8}, \operatorname{ctg} \frac{\pi}{8} \right) + T \left( \sqrt{\Lambda} \sin \frac{3\pi}{8}, \operatorname{ctg} \frac{3\pi}{8} \right) \right) \right), \quad (3)$$

де  $\Lambda = 6 \left( (h_0^2)^{-1} + \left( \frac{q}{3} \right)^{-1} \right)^{-1}$ ,

– КАМ-16:

$$P_B = \frac{1}{2} (3Q(\sqrt{T}) + 2Q(3\sqrt{T}) - Q(5\sqrt{T})), \quad (4)$$

де  $T = \frac{4}{9} \left( (h_0^2)^{-1} + \left( \frac{q}{4} \right)^{-1} \right)^{-1}$ .

У виразах (1)–(4)  $h_0^2 = E_b / G_0$ ,  $E_b$  – енергія біта,  $G_0$  – спектральна щільність потужності шуму,  $q = \frac{K_s \cdot P_b}{P_j}$ ,  $P_b$  – потужність сигналу,  $P_j$  –

потужність завади,  $K_s$  – коефіцієнт розширення спектра,

$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$  – функція інтеграла ймовірності,

$T(h, a) = \frac{1}{2\pi} \int_0^a \exp\left[\left(-\frac{h^2}{2}(1+x^2)\right)\right] \frac{1}{1+x^2} dx$  – функція Д. Оуена, призначена

для обчислення функції двовимірного нормального розподілу.

Точні формули ймовірності бітової помилки для модуляції ФМ-2, ФМ-4, ФМ-8, КАМ-16 при впливі ШЗЧЗ мають вигляд:

– ФМ-2:

$$P_{B1} = (1 - \gamma) Q(\sqrt{2h_0^2}) + \gamma Q \left( \sqrt{2 \left( (h_0^2)^{-1} + (\gamma \cdot q)^{-1} \right)^{-1}} \right), \quad (5)$$

– ФМ-4:

$$P_{B1} = (1 - \gamma) Q(\sqrt{2h_0^2}) + \gamma Q \left( \sqrt{2 \left( (h_0^2)^{-1} + \left( \gamma \cdot \frac{q}{2} \right)^{-1} \right)^{-1}} \right), \quad (6)$$

– ФМ 8:

$$P_{B1} = (1 - \gamma) \frac{1}{3} \left( Q \left( \sqrt{6h_0^2} \sin \frac{\pi}{8} \right) + Q \left( \sqrt{6h_0^2} \sin \frac{3\pi}{8} \right) + 2 \left( T \left( \sqrt{6h_0^2} \sin \frac{\pi}{8}, \operatorname{ctg} \frac{\pi}{8} \right) + T \left( \sqrt{6h_0^2} \sin \frac{3\pi}{8}, \operatorname{ctg} \frac{3\pi}{8} \right) \right) \right) +$$

$$+ \gamma \frac{1}{3} \left( Q \left( \sqrt{O} \sin \frac{\pi}{8} \right) + Q \left( \sqrt{O} \sin \frac{3\pi}{8} \right) + 2 \left( T \left( \sqrt{O} \sin \frac{\pi}{8}, \operatorname{ctg} \frac{\pi}{8} \right) + T \left( \sqrt{O} \sin \frac{3\pi}{8}, \operatorname{ctg} \frac{3\pi}{8} \right) \right) \right), \quad (7)$$

де  $O = 6 \left( (h_0^2)^{-1} + \left( \gamma \cdot \frac{q}{3} \right)^{-1} \right)^{-1}$ ,

– КАМ-16:

$$P_{B1} = (1 - \gamma) \left( \frac{1}{2} \left( 3Q \left( \sqrt{\frac{4}{9} h_0^2} \right) + 2Q \left( 3\sqrt{\frac{4}{9} h_0^2} \right) - Q \left( 5\sqrt{\frac{4}{9} h_0^2} \right) \right) \right) + \gamma \frac{1}{2} \left( 3Q(\sqrt{\Omega}) + 2Q(3\sqrt{\Omega}) - Q(5\sqrt{\Omega}) \right) \quad (8)$$

де  $\Omega = \frac{4}{9} \left( (h_0^2)^{-1} + \left( \gamma \frac{q}{4} \right)^{-1} \right)^{-1}$ .

У випадку впливу ЗВ точні формули ймовірності бітової помилки для модуляції ФМ-2, ФМ-4, ФМ-8, КАМ-16 мають вид:

– ФМ-2, ФМ-4:

$$P_{B2} = (1 - \gamma) Q \left( \sqrt{2h_0^2} \right) + \gamma Q \left( \sqrt{2 \left( (h_0^2)^{-1} + (h_j^2)^{-1} \right)^{-1}} \right), \quad (9)$$

– ФМ-8:

$$P_{B2} = (1 - \gamma) \frac{1}{3} \left( Q \left( \sqrt{6h_0^2} \sin \frac{\pi}{8} \right) + Q \left( \sqrt{6h_0^2} \sin \frac{3\pi}{8} \right) + 2 \left( T \left( \sqrt{6h_0^2} \sin \frac{\pi}{8}, \operatorname{ctg} \frac{\pi}{8} \right) + T \left( \sqrt{6h_0^2} \sin \frac{3\pi}{8}, \operatorname{ctg} \frac{3\pi}{8} \right) \right) \right) + \gamma \frac{1}{3} \left( Q \left( \sqrt{\Theta} \sin \frac{\pi}{8} \right) + Q \left( \sqrt{\Theta} \sin \frac{3\pi}{8} \right) + 2 \left( T \left( \sqrt{\Theta} \sin \frac{\pi}{8}, \operatorname{ctg} \frac{\pi}{8} \right) + T \left( \sqrt{\Theta} \sin \frac{3\pi}{8}, \operatorname{ctg} \frac{3\pi}{8} \right) \right) \right), \quad (10)$$

де  $\Theta = 6 \left( (h_0^2)^{-1} + (h_j^2)^{-1} \right)^{-1}$ ,  $h_j^2 = \frac{E_b}{G_j}$  – відношення енергії біта до спектральної

щільності потужності завади,

– КАМ-16:

$$P_{B2} = (1 - \gamma) \left( \frac{1}{2} \left( 3Q \left( \sqrt{\frac{4}{9} h_0^2} \right) + 2Q \left( 3\sqrt{\frac{4}{9} h_0^2} \right) - Q \left( 5\sqrt{\frac{4}{9} h_0^2} \right) \right) \right) + \gamma \frac{1}{2} \left( 3Q(\sqrt{\Psi}) + 2Q(3\sqrt{\Psi}) - Q(5\sqrt{\Psi}) \right), \quad (11)$$

де  $\Psi = \frac{4}{9} \left( (h_0^2)^{-1} + (h_j^2)^{-1} \right)^{-1}$ .

При впливі оптимальної ШЗЧС на БЗПД, максимальна середня ймовірність бітової помилки для модуляцій ФМ-2, ФМ-4, ФМ-8, КАМ-16 буде дорівнювати відповідно:

– ФМ-2:

$$P_{B1\text{MAX}} \approx \frac{0,088}{q}, \quad q \geq 0,694, \quad (12)$$



– ФМ-4:

$$P_{B1_{MAX}} \approx \frac{0,176}{q}, q \geq 1,389, \quad (13)$$

– ФМ-8:

$$P_{B1_{MAX}} \approx \frac{0,4}{q}, q \geq 4,742, \quad (14)$$

– КАМ-16:

$$P_{b1_{max}} \approx \frac{2,397}{q}, q \geq 12,625. \quad (15)$$

При впливі оптимальної ЗВ на БЗПД, максимальна середня ймовірність бітової помилки для модуляцій ФМ-2, ФМ-4, ФМ-8, КАМ-16 буде мати наступний вигляд:

– ФМ-2, 4:

$$P_{B2_{MAX}} \approx 0,65 \cdot \exp \left[ -0,44 \left( \sqrt{2 \left( (h_0^2)^{-1} + \left( 9 \cdot \frac{h_0^2}{32 \cdot h_0^2 - 9} \right)^{-1} \right)^{-1}} + 0,75 \right)^2 \right], \quad (16)$$

– ФМ-8:

$$P_{B2_{MAX}} \approx 0,433 \cdot \exp \left[ -0,44 \left( \sqrt{6 \left( (h_0^2)^{-1} + \left( 9 \cdot \frac{h_0^2}{14,016 \cdot h_0^2 - 9} \right)^{-1} \right)^{-1}} \sin \frac{\pi}{8} + 0,75 \right)^2 \right], \quad (17)$$

– КАМ-16:

$$P_{b_{max}} = 0,975 \cdot \exp \left[ -0,44 \left( \sqrt{\left[ \left( (h_0^2)^{-1} + \left( 9 \cdot \frac{h_0^2}{7,04 \cdot h_0^2 - 9} \right)^{-1} \right)^{-1}} \cdot 0,44 + 0,75 \right]^2} \right). \quad (18)$$

Визначимо ймовірність бітової помилки декодування при використанні кодів Боуза-Чоудхури-Хоквінгема (БЧХ), Ріда-Соломона та турбо кодів. При використанні кодів БЧХ і Ріда-Соломона розглядається демодулятор з “жорстким” рішенням, а при використанні турбо кодів – з “м’яким” рішенням.

Основними параметрами блокових кодів є [8]: число інформаційних бітів  $k$  і довжина коду  $n$ ; відносна швидкість коду  $R = k/n$ ; мінімальна кодова відстань  $d$ , рівна найменшому значенню відстані Хеммінга, яка являє собою число позицій, де кодові комбінації відрізняються одна від одної; максимальне число помилок, що виправляються, на довжині кодового слова  $S$ , пов’язане з  $d$  залежністю  $S = ((d-1)/2)$ , де  $[*]$  – ціла частина числа; надмірність коду, під якою розуміється параметр  $\alpha = R/n = 1 - R$ , що визначає частку надлишково переданих символів.

У випадку використання завадостійкого кодування в аналітичних залежностях для розрахунку середньої ймовірності бітової помилки для модуляцій ФМ-2, ФМ-4, ФМ-8, КАМ-16, КАМ-64 необхідно враховувати, що енергія каналного символу [8]:

$$E_c = \left(\frac{k}{n}\right) \cdot E_b = R \cdot E_b$$

Середня ймовірність бітової помилки декодування при використанні блокових кодів Хеммінга визначається наступним вираженням:

$$P_{B \text{ дек}} = P_B - P_B \cdot (1 - P_B)^{n-1}$$

де  $n$  – довжина кода,  $P_B$  – середня ймовірність бітової помилки для різних видів модуляцій при різних стратегіях постановки навмисних завад, яка розраховується для конкретної заводової обстановки.

Таким чином, середня ймовірність бітової помилки декодування з урахуванням впливу навмисних завад визначається

$$P_{B \text{ дек}} = P_B - P_B \cdot (1 - P_B)^{n-1}, \quad (19)$$

де  $P_B$  розраховується по (1)–(4) для ШЗЗ; по (5)–(8) для ШЗЧС; по (9)–(11) для ЗВ; по (12)–(15) для оптимальної ШЗЧС та по (16)–(18) для оптимальної ЗВ відповідно для модуляцій ФМ-2, ФМ-4, ФМ-8, КАМ-16.

При використанні кодів Ріда-Соломона середня ймовірність бітової помилки декодування визначається наступним аналітичним виразом:

$$P_{B \text{ дек}} = \frac{1}{2^m - 1} \sum_{j=d+1}^{2^m-1} \left[ \frac{(2^m - 1)!}{(2^m - 1 - j)! \cdot j!} \cdot j \cdot (P_B)^j \cdot (1 - P_B)^{2^m-1-j} \right],$$

де  $m$  – бітова послідовність кодового символу,  $d$  – кількість помилкових бітів у символі, які може виправити код,  $P_B$  – середня ймовірність бітової помилки для різних видів модуляцій при різних стратегіях постановки навмисних завад, яка розраховується для конкретної заводової обстановки.

Таким чином, середня ймовірність бітової помилки декодування з урахуванням впливу навмисних завад визначається:

$$P_{B \text{ дек}} = \frac{1}{2^m - 1} \sum_{j=d+1}^{2^m-1} \left[ \frac{(2^m - 1)!}{(2^m - 1 - j)! \cdot j!} \cdot j \cdot (P_B)^j \cdot (1 - P_B)^{2^m-1-j} \right], \quad (20)$$

де  $P_B$  розраховується за (1)–(4) для ШЗЗ; за (5)–(8) для ШЗЧС; за (9)–(11) для ЗВ; за (12)–(15) для оптимальної ШЗЧС та за (16)–(18) для оптимальної ЗВ відповідно для модуляцій ФМ-2, ФМ-4, ФМ-8, КАМ-16.

У випадку застосування турбо кодів значення середньої ймовірності бітової помилки декодування для заданої заводової обстановки отримуються тільки шляхом проведення імітаційного моделювання, тому що точних аналітичних співвідношень для визначення характеристик заводозахищеності не існує. В цьому випадку необхідно використовувати статистичну імітаційну модель, запропоновану в [9].

На наступному етапі розробимо метод підготовки первинної інформації для адаптивних безпроводових засобів передачі даних.

Метод призначений для вибору структури та параметрів кодів в адаптивних БЗПД, що дозволить забезпечити задані показники достовірності інформації в БЗПД.

При реалізації методу визначимо такі обмеження:  $\mathbf{T}^{(1)} = const$ , алгоритм декодування Max Log Map, швидкість кодування  $R \geq 1/5$ ; кількість декодерів в ітерації декодування два або три, модуляція ФМ-2, ФМ-4, ФМ-8, КАМ-16.

Метод реалізується в наступній послідовності:

1. Визначення вихідних даних: масив даних завод  $\mathbf{Z}$ , масив даних фіксованих параметрів турбо коду  $\mathbf{T}$ , масив даних змінних параметрів ТК  $\mathbf{T}_v$ , масив даних параметрів кодів Хеммінга  $\mathbf{H}$ , масив даних параметрів кодів Ріда-Соломона  $\mathbf{R}$ , задана ймовірність бітової помилки декодування  $P_{V \text{ дек зад}}$ .

2. Розрахунок середньої ймовірності бітової помилки  $P_B$  для заданого виду модуляції сигналу та заданої стратегії постановки навмисних завод:

- для ШЗЗ за (1)–(4) відповідно з обраним видом модуляції;
- для ШЗЧС за (5)–(8) відповідно з заданим видом модуляції;
- для ЗВ за (9)–(11) відповідно з заданою модуляцією сигналу;
- для оптимальної ШЗЧС за (12)–(15) відповідно з обраною модуляцією;
- для оптимальної ЗВ за (16)–(18) відповідно з заданим видом модуляції.

3. Розрахунок середньої ймовірності бітової помилки декодування  $P_{B \text{ дек}}$  для блокових кодів Хеммінга та заданої стратегії постановки навмисних завод за (19).

4. Порівняння  $P_{B \text{ дек}} \leq P_{B \text{ дек зад}}$ . Якщо порівняння виконується, то виконується перехід до п. 14, якщо ні – до п. 5.

5. Розрахунок середньої ймовірності бітової помилки декодування  $P_{B \text{ дек}}$  для кодів Ріда-Соломона та заданої стратегії постановки навмисних завод за (20).

6. Порівняння  $P_{B \text{ дек}} \leq P_{B \text{ дек зад}}$ . Якщо порівняння виконується, то виконується перехід до п. 14, якщо ні – до п. 7.

7. За допомогою імітаційного моделювання визначення середньої ймовірності бітової помилки декодування  $P_{B \text{ дек}}$  для двохкомпонентних турбо кодів та заданої стратегії постановки навмисних завод.

8. Порівняння  $P_{B \text{ дек}} \leq P_{B \text{ дек зад}}$ . Якщо порівняння виконується, то виконується перехід до п. 14, якщо ні – до п. 9.

9. За допомогою імітаційного моделювання визначення середньої ймовірності бітової помилки декодування  $P_{B \text{ дек}}$  для трьохкомпонентних турбо кодів та заданої стратегії постановки навмисних завод.

10. Порівняння  $P_{B \text{ дек}} \leq P_{B \text{ дек зад}}$ . Якщо порівняння виконується, то виконується перехід до п. 14, якщо ні – до п. 11.

11. Зміна параметрів трьохкомпонентного турбо коду відповідно до масиву даних змінних параметрів турбо коду  $T_v$  та визначення за допомогою імітаційного моделювання середньої ймовірності бітової помилки декодування  $P_{V \text{ дек}}$ .

12. Порівняння  $P_{V \text{ дек}} \leq P_{V \text{ дек зад}}$ . Якщо порівняння виконується, то виконується перехід до п. 14, якщо ні – до п. 13.

13. Кількість змін параметрів закінчено? Якщо так, то виконується перехід до п. 14, якщо ні – до п. 11.

14. Визначення обраної кодової конструкції для заданої стратегії постановки навмисних завад.

На рис. 1 показана залежність ймовірності бітової помилки при модуляції ФМ-2, АБГШ та ШЗЧС ( $\gamma = 1$ ) при використанні блокових кодів Хеммінга (15,11), кодів Ріда-Соломона (31,21,5), двох- та трьохкомпонентних турбо кодів з псевдовипадковим перемежувачем,  $N = 1000$ , алгоритмом декодування *Max Log Map*, 8 ітерацій декодування, швидкістю кодування турбо коду  $R = 1/3$ .

Аналіз залежностей свідчить, що для забезпечення  $P_{V \text{ дек зад}} = 10^{-4}$  дБ відношення сигнал-завада складає: без кодування 9,2 дБ, при використанні кодів Хеммінга – 7,5 дБ, Ріда-Соломона – 4,3 дБ, двохкомпонентного турбо коду – 2,2 дБ, трьохкомпонентного ТК – 1,6 дБ. Таким чином, отримані енергетичні вигоди в порівнянні з некодованою інформаційною послідовністю. Так, використання блокового коду підвищує енергетичну ефективність в 1,46 рази (1,7 дБ), використання коду Ріда-Соломона – в 3,09 рази (4,9 дБ), використання двох- та трьохкомпонентного турбо коду – в 5,01 та 5,75 разів (7,0 дБ та 7,6 дБ) відповідно, при забезпеченні заданого значення достовірності інформації в БЗПД.

Таким чином, у статті запропоновано метод підготовки первинної інформації для адаптивних БЗПД, що дозволить забезпечити задані показники достовірності інформації в БЗПД, при цьому енергетичний вигащ складає 0,8 дБ у порівнянні з відомими методами. Сутність методу полягає у використанні нових аналітичних залежностей визначення середньої ймовірності бітової помилки декодування для блокових кодів та кодів Ріда-Соломона, визначенні середньої ймовірності бітової помилки декодування для турбо кодів шляхом імітаційного моделювання для різних стратегій завад, порівнянні отриманих значень середньої ймовірності бітової помилки декодування з пороговим значенням та визначенні за запропонованим алгоритмом кодових конструкцій. Відмінність розробленого методу від існуючих, що визначає його новизну, полягає в збільшенні мірності простору кодів та завад, а також використанні нових аналітичних співвідношень для розрахунку середньої ймовірності бітової помилки з урахуванням параметрів завад та використанні трьохкомпонентного турбо коду, що дозволяє забезпечити задані показники достовірності інформації в БЗПД.

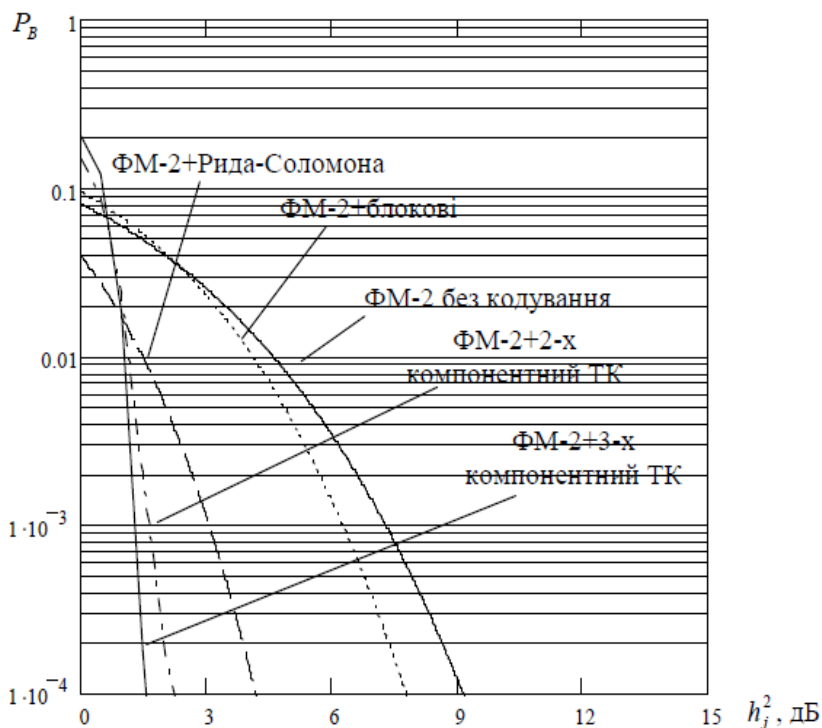


Рисунок 1 – Графік залежності середньої ймовірності бітової помилки від відношення сигнал-завада для різних типів кодів

Ефект від впровадження полягає в тому, що використання методу за рахунок впровадження отриманих нових аналітичних залежностей із врахуванням параметрів завад дозволяє забезпечити задані показники достовірності інформації в БЗПД, при цьому енергетичний виграш кодування за рахунок використання трьохкомпонентного турбо коду складає 0,8 дБ.

## Висновки

1. На основі нових аналітичних залежностей для розрахунку середньої ймовірності бітової помилки для кодових конструкцій розроблено метод підготовки первинної інформації для адаптивних БЗПД.

2. Результати моделювання характеристик достовірності адаптивних БЗПД з використанням методу за рахунок впровадження отриманих нових аналітичних залежностей із врахуванням параметрів завад дозволяє забезпечити задані показники достовірності інформації в БЗПД, при цьому енергетичний виграш кодування за рахунок використання трьохкомпонентного турбо коду складає 0,8 дБ у порівнянні з відомими методами.

3. Напрямок подальших досліджень вважається вдосконалення методу на випадок впливу навмисних завад при завмираннях сигналу та багатопробному поширенні радіохвиль.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Zhenhuan W. Layered Adaptive Modulation and Coding For 4G Wireless Networks / W. Zhenhuan // Thesis presented to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the degree of Master of Applied Science in Electrical and Computer Engineering. – Waterloo, Ontario, Canada, 2011. – 49 p.
2. Jihoon K. A Simple SNR Representation Method for AMC Schemes of MIMO Systems with ML Detector / K. Jihoon, L. Kyoung-Jae, S. Chang Kyung, L. Inkyu // IEEE Transactions on Communications. – 2009. – Vol. 57, N 10. – P. 2971–2976.
3. Liang Huang J. Adaptive MIMO Systems with Channel State Information at Transmitter / J. Liang Huang // PhD Thesis, KTH School of Information and Communication Technology. – Stockholm, 2009. – 79 p.
4. Goldsmith A. Variable-rate variable-power MQAM for fading channels / A. Goldsmith, S. Chua // IEEE Transactions on Communications. – 1997. – Vol. 45, N 10. – P. 1218–1230.
5. Zaitsev S. V. Structural adaptation of the turbo code coder and decoder for generating the transmission repeat request under conditions of uncertainty / S. V. Zaitsev, V. V. Kazymyr // Radioelectronics and Communications Systems. – Springer, 2017. – Vol. 60. – P. 18–27.
6. Zaitsev S. V. Adaptive selection of parameters of s-random interleaver in wireless data transmission systems with turbo coding / S. V. Zaitsev, V. V. Kazymyr, V. M. Vasilenko, A.V. Yarilovets // Radioelectronics and Communications Systems. – Allerton Press, Inc. – New York, 2018. – Vol. 61. – P. 13–21. DOI: 10.3103/S0735272715050039.
7. Дослідження впливу навмисних завад на відомчі системи радіозв'язку при когерентному прийомі сигналів для каналів зв'язку з білим шумом / С. П. Лівенцев, С. В. Зайцев, Б. В. Горлинський // Збірник наукових праць ВІПІ НТУУ “КПІ”. – 2007. – Вип. 3. – С. 37–44.
8. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Скляр Б. – [2-е изд]. – М.: Вильямс, 2003. – 1104 с.
9. Свідцтво про реєстрацію авторського права на твір № 33677. Комп'ютерна програма «Імитаційна модель фізического рівня програмуємої радиостанції с многокомпонентними турбо кодами» / Горлинський Б.В., Зайцев С.В., Лівенцев С.П.; зареєстроване 10.06.2010.

## REFERENCES

1. Zhenhuan W. Layered Adaptive Modulation and Coding For 4G Wireless Networks / W. Zhenhuan // Thesis presented to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the degree of Master of Applied Science in Electrical and Computer Engineering. – Waterloo, Ontario, Canada, 2011. – 49 p.
2. Jihoon K. A Simple SNR Representation Method for AMC Schemes of MIMO Systems with ML Detector / K. Jihoon, L. Kyoung-Jae, S. Chang Kyung, L. Inkyu // IEEE Transactions on Communications. – 2009. – Vol. 57, N 10. – P. 2971–2976.
3. Liang Huang J. Adaptive MIMO Systems with Channel State Information at Transmitter / J. Liang Huang // PhD Thesis, KTH School of Information and Communication Technology. – Stockholm, 2009. – 79 p.
4. Goldsmith A. Variable-rate variable-power MQAM for fading channels / A. Goldsmith, S. Chua // IEEE Transactions on Communications. – 1997. – Vol. 45, N 10. – P. 1218–1230.
5. Zaitsev S. V. Structural adaptation of the turbo code coder and decoder for generating the transmission repeat request under conditions of uncertainty / S. V. Zaitsev, V. V. Kazymyr // Radioelectronics and Communications Systems. – Springer, 2017. – Vol. 60. – P. 18–27.

6. Zaitsev S. V. Adaptive selection of parameters of s-random interleaver in wireless data transmission systems with turbo coding / S. V. Zaitsev, V. V. Kazymyr, V. M. Vasilenko, A. V. Yarilovets // Radioelectronics and Communications Systems. – Allerton Press, Inc. – New York, 2018. – Vol. 61. – P. 13–21. DOI: 10.3103/S0735272715050039.
7. Investigation of the effect of intentional interference on departmental radio systems with coherent signal reception for white noise channels / S. P. Liventsev, S. V. Zaitsev, B. V. Horlynskyi // Zbirnyk naukovykh prac' VITI NTUU "KPI". – 2007. – Vol. 3. – P. 37–44.
8. Bernard Sklar. Digital Communications: Fundamentals and Applications. – 2001, – 1104 pages.
9. Certificate of copyright registration of a work № 33677. Computer program «Simulation model of the physical layer of a programmable radio station with multicomponent turbo codes» / Horlynskyi B. V., Zaitsev S. V., Liventsev S. P.; registered 10.06.2010.

*Стаття надійшла до редакції 03.10.2019.*

**O. I. ZAKHOZHAY****SITUATIONAL-EVENT MODEL OF THE HYBRID PATTERNS  
RECOGNITION FOR HETEROGENEOUS DATA PROCESSING IN  
COMPLEX SYSTEMS**

***Abstract.** In the article represented the new situational-event model of hybrid patterns recognition. This model based on representation a heterogeneous data of a complex system in the form of patterns set, sets of external conditions characteristics as manifestations of a current situation, a static component of a situation – in the form of stationary informativity characteristics, a dynamic component in the form of a nonstationary informativity characteristics and the set of classes as recognitions result. The developed model using provides a priory level of classification reliability, based on analysis of a smaller set but the most informative signs.*

***Keywords:** hybrid patterns recognition, making-decision methods, data classification reliability, time-complexity of recognition algorithms, data processing in complex systems, program engineering, information systems and technologies.*

**DOI: 10.35350/2409-8876-2019-17-4-16-25****Introduction**

For data analysis in complex systems, methods and means of pattern recognition are traditionally used [1-5]. This is due to the impossibility of complete formalization and mathematical model's representation of such systems [1, 3, 4, 6]. At the same time, the situation becomes complicated because the large quantity of data, that characterizing a complex system also are heterogeneity [7, 8]. For data processing in complex systems the combined recognition is widely used [1, 7, 9-15]. However, the analysis shows, that with heterogeneous data, this approach is not effective. For combined recognition with a large amount of data, obtaining a reliable result is associated with a large time complexity [11-14]. That makes practical application of such algorithms much more difficult. In addition, combined recognition is not effective with dynamic interference and distortion of the external environmental condition for the complex system [8, 16, 17].

Hybrid recognition [18], which in some sources is also called multi-parameter combined recognition [16, 17, 19, 20], are using for data processing in complex systems, where information patterns have a different nature of origin. It creates a possibility for getting high-reliability classification result at the changing of different interferences and distortion in environmental condition for recognition object. But, for decreasing time-complexity and maximizing accuracy result, the decision-making should be received by less quantity of information signs. For complex systems, its aspect is complicated by the heterogeneous data, that to be processed, also different physical nature of interference and distortion in environmental condition and dynamical changing their intensity level.



Existing approaches to solving that trouble are related with increasing quantity of informative signs of complex systems. It finds confirmation by the Vapnik-Chervonenkis deep probabilistic theory of patterns recognition, which is called also VC-theory [21, 22]. Thus, increasing quality of information signs leads to the level of reliability is grow. But if the complex system characterized by heterogeneous data and their informativity level depends on interference and distortion – reliable classification level will not grow unequivocally with an increase in the number of signs. The signs affected by interference and distortion will be significant source of classification errors. Thus, the heterogeneous data of complex systems should be had maximal informativity level for current interferences and distortion, that have been present in environmental condition.

According to the aforesaid, creating the new approach to increasing classification reliability and minimizing time-complexity of heterogeneous data analysis have a relevance for modern science and technology. The solution to this problem is seen in the development of a new model of hybrid image recognition.

**1. Subject area analysis and statement of the problem**

For the heterogeneous data processing in complex systems, is widely used that model [1, 10]:

$$P = \{X\}^d \cup \{X\}^p \cup \{X\}^l \cup \{X\}^s, \tag{1}$$

where  $\{X\}^d$  – set of deterministic, probabilistic, logic and structure (linguistics) in complex systems signs.

Based on model (1), at the heterogeneous data processing, both direct and reverse recognition task can have implemented [1, 3, 23]:

$$\forall C \in \{C\}, C \Leftrightarrow \{\{X\}^d \cup \{X\}^p \cup \{X\}^l \cup \{X\}^s\}, \tag{2}$$

where  $\{C\}$  – classes alphabet, where everyone class  $C$  is characterizing the compliance status of complex system.

The heterogeneous data processing is carried out in the following sequence.

1) The system of the reference set of the algorithm is determined. From signs set  $\{X\}$ , selecting subsets  $S_1 \dots S_q$  had becomes.

2) Calculates the proximity measure of recognition object  $O_r$  and everyone representative object with known classification result, and total estimate is determined:

$$\left\{ \begin{aligned} \Gamma(O_r, C_1) &= \Gamma_{s_1}(O_r, C_1) + \dots + \Gamma_{s_q}(O_r, C_1), \\ &\dots \\ \Gamma(O_r, C_m) &= \Gamma_{s_1}(O_r, C_m) + \dots + \Gamma_{s_q}(O_r, C_m), \end{aligned} \right. \tag{3}$$

where  $\Gamma_{s_q}(O_r, C_m)$  – compliance estimate for object  $O_r$  and class  $C_m$  by signs subset  $S_q$ .

3) Next, the rules are specified by which a classification decision can be made in the following sequence:

- the similarity rules of the reference and analyzed object, which allow according to a measure estimate to calculate a value that is an estimate for pairs of objects;
- the rules of estimates forming for each class according to a fixed reference set based on estimates of pairs for objects;
- the rules of summary estimates forming for each class according to all reference set;
- the decision-making rules that, based on the estimates for classes, ensure that the recognition object is classed to one of the classes or, conversely, deny such classification.

However, for complex systems, the main information is not in individual characteristics, but in their different combinations [23]. Since in complex systems it is not always known which combinations are informative, in algorithms of calculation of estimates the measure of similarity of objects is calculated not by sequential comparison of individual characteristics, but by comparison of all possible characteristics that describe a complex system [23].

Thus, combined recognition for analysis of non-uniform data in complex systems is associated with a large power of reference sets. As results – the large number of computational operations. In addition, combined recognition does not take into account the fact that various interferences and distortions result in not all patterns having the same information value and allow for a reliable solution. In addition, it should be noted that the effect of interference and distortion, and thus the information of signs, is dynamic.

Hybrid recognition can take into account the effects of interference and distortion by describing a complex system with a set of patterns that have different nature origins [18, 23].

Hybrid recognition uses two approaches: joint patterns analysis [17] and separate patterns analysis [16].

In joint analysis, all patterns signs of different nature are combined into one pattern together. After that, the data processing is performed by classical methods of combined recognition [17]. The positive effect in such a case is to use more independent numbers of signs on which the interferences and distortions have different effects.

The maximum benefit of hybrid recognition can be obtained using separate analysis. In this case, patterns are not merged into a single global pattern and are processed until the a priori specified recognition reliabilities is obtained to one or more patterns [16, 18, 23]. This variant is natural for multithreaded data processing. Given the heterogeneity of the data, different algorithms can be applied in different stream to match the characteristics and calculate the degree patterns proximity to representative descriptions of classes for the complex system. The classification decision-making based on searching of patterns groups with identical classifications [18]. Since it is a priori known that each image of a complex system must point to the same class, in the case of an ideal display system and no interferences and distortion of signs, absolutely reliable result will be obtained. At the same time, the presence of interference and distortion leads to the facts that part of the patterns to indicate erroneous classification variants.

In these circumstances, the possibility of obtaining the most reliable solution in the minimum time is solely due to the need to exclude from processing less informative images that have been subject to maximum distortion and transformation.

Thus, an important scientific and technical task is formed – ensuring a reliability classification decision-making in hybrid recognition based on analysis of a smaller set of the most informative signs.

## 2. Solving problem

For solving task of maximizing recognition reliability and reduction quantity of less-informativity signs of patterns was developed the new situational-event model of hybrid patterns recognition which gives possibility for the patterns selecting with most informativity and create classification result based on matching fewer data. Thus, the set of data to be processed, varies according to the changes state of the environmental condition, interferences and distortion level. This model is represented on cortege such view

$$SEMHPR = \langle P, EC, SICH, NSICH, C \rangle, \quad (4)$$

where  $P$  – a patterns set of complex system, which forms on the multiple information sources different nature origin;

$EC$  – an environmental condition set that characterized a current situation;

$SICH$  – a patterns stationary informativity characteristics of complex systems;

$NSICH$  – a patterns nonstationary informativity characteristics of complex systems;

$C$  – a classes set, that complex systems characterized.

According to this model, the current state of a complex system is defined on the basis of receiving set of its images which signs have the different nature of origin. Besides, receive the external conditions characteristics set allows to define degree of informational content for each pattern and to provide accept reliable the decision. For this purpose, on the basis of set  $EC$  provide determining of stationary and non-stationary informativity characteristics for everyone a pattern from  $\{P\}$ .

If to present that pattern of recognition object  $P$  is described by some function  $P = f(x, y)$ , where  $x, y$  – arguments, that define characteristic of object, which is in some space  $\Omega$ . Then reflection of this object  $I$  defined as  $I = g(x', y')$ , where  $x', y'$  – arguments that define patterns characteristic which is in some information space  $\Omega'$ . In the case of an ideal reflective system, for any point of space the condition satisfied:  $g = f$ . In reality, that condition cannot be fully executed. This is due to the reflection distortion that have a presence. According to relation between objects space and their patterns space, the reflection of space point will be defined as:

$$g'(x', y') = h(x', y', \alpha, \beta, f'(\alpha, \beta)), \quad (5)$$

where  $(\alpha, \beta)$  – point of space`s coordinate

$h(x', y', x, y)$  – function, that described the spatial relation between an object and its reflection.

Obviously, for other source that have same placement

$$g(x', y') = h(x', y', \alpha, \beta, f(\alpha, \beta)). \quad (6)$$

On the common situation, ratio of objects space and patterns space for nonlinear system will have a next form:

$$g(x', y') = \iint_{x \in X, y \in Y} h(x', y', f(x, y)) dx dy. \quad (7)$$

For a linear system:

$$g(x', y') = \iint_{x \in X, y \in Y} h(x', y') f(x, y) dx dy. \quad (8)$$

As at hybrid patterns recognition the signs have the different nature of origin, value  $x$  and  $y$  do not correlate with each other and function  $h$  will have an appearance:

$$h(x', y', x, y) = h'(x', x) h(y', y). \quad (9)$$

This function takes into account the distortion of the object in the pattern space, and the resulting pattern will be represented as:

$$P = \iint_{x \in X, y \in Y} h(x', y', x, y) f(x, y) dx dy + \xi(x', y'), \quad (10)$$

where  $\xi(x', y')$  – the distortions distribution characteristic of objects in pattern space.

Taking into account (4) and on the basis of (10), at hybrid recognition, the complex system description model will have an appearance

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1 = \iint_{x \in X, y \in Y} h_1(x', y', x, y) f_1(x, y) dx dy + \xi_1(x', y'), \\ P_2 = \iint_{x \in X, y \in Y} h_2(x', y', x, y) f_2(x, y) dx dy + \xi_2(x', y'), \\ \dots \dots \dots \\ P_k = \iint_{x \in X, y \in Y} h_k(x', y', x, y) f_k(x, y) dx dy + \xi_k(x', y'). \end{array} \right. \quad (11)$$

Based on model (1), the stationary informativity characteristic for each patterns of complex system are determined so:

$$SICH_k = \frac{I}{h_k(x', y', x, y)}, \quad (12)$$

where  $h_k$  – directly, is characteristics of information displaying means (an accuracy characteristic of sensors for complex systems parameters registration and also accuracy of data transferring interfaces). As the structure of information system do not changing in system life-time, these characteristics need only a priori definitions and are constants in the course of further operation cycles of non-uniform data.

The nonstationary informativity characteristics for each from  $k$  patterns are determined so:

$$NSICH_k = \frac{I}{\xi_k(x', y')}, \quad (13)$$

where  $\xi_k$  – is characteristics of the current interferences and distortion for each patterns of complex system. These characteristics change throughout systems life-cycle in depending on the current environmental conditions. This characteristics set is non-stationary and demands constant control on each cycle of classification decision-making.

The general informativity characteristic of each patterns will be defined as multiplication of two components: stationary and nonstationary. The most reliable solution  $Rd$  is obtained behind the result of patterns analysis, that satisfies informational criterion:

$$\exists P_k \in \{P\}, \max ICh_k \Rightarrow Rd. \quad (14)$$

The patterns that, on current observation conditions for recognitions object, have an information characteristic less than a priori caused – mast keep from recognition. Thus, implementation the situational analysis conception by selected data that having higher informativity level behind current situations, allowed to solve task – ensuring the reliability classification decision-making in hybrid recognition based on analysis of a smaller set of the most informative signs.

The situational-event model of the hybrid patterns recognition, that have been represented, had find the using on three different applied solution. It was: information systems of temperature's spatial distribution monitoring for coke pie [24], information system of ultrasonic linear distance measurement for automation systems [25] and information system of text-unique level analysis [26]. In these solutions, mean an 18% reduction in the amount of data processed was obtained for a priori given level of recognition reliability of 85%. This effect is clarified by the use of situational processing of the most informative data under current environmental conditions. Thus, the main problem was solved.

## Conclusion

The main results presented in it work consist in the following.

1. For efficient application of recognition, it is necessary to provide processing of less but more informative data in the current situation and level of interference and distortion.
2. For ensuring a priory defined reliability of recognition at simultaneous decrease a time-complexity of the heterogeneous data analysis, the new situational-

event model of hybrid patterns recognition was developed. That model considers the level of stationary and non-stationary informativity characteristics of complex systems patterns was developed. In this case, decision-making happens on the basis of processing smaller quantity, however the most informative data (at the current level of hindrances and distortions as manifestations of a situation).

The efficiency of the offered model was confirmed experimentally for three various information systems: analysis of spatial distribution of temperature of coke pie, ultrasonic measurement of linear distances and verifications of text data on uniqueness. For all three applications, a positive result was obtained that confirmed the correctness of the problem solution.

## REFERENCES

1. Simankov V. S., Lutsenko E. V., Adaptive management of complex systems based on the theory of pattern recognition. Krasnodar: Techn. univ. Kuban state technol. univ., 1999. – 318 p. (in Russian)
2. Leigh W., Purvis R., Ragusa J.M., Forecasting the NYSE composite index with technical analysis, pattern recognizer, neural network, and genetic algorithm: a case study in romantic decision support. *Decision Support Systems*. – 2002. – vol. 32, – pp. 361-377. (in English)
3. Yang-Yu Liu, Albert-Laszlo Barabasi, Control principles of complex systems. *Review of modern physics*. – 2016. – vol. 88. – iss. 3., – 58 p. DOI: 10.1103/RevModPhys.88.035006. (in English)
4. Kyriakos G. Vamvoudakis, Sarangapani Jagannathan, Control of complex systems. Elsevier Inc., 2016. – 762 p. DOI:10.1016/C2015-0-02422-4 (in English)
5. Wen Q., Yang Z., Song Y., Jia P., Automatic stock decision support system based on box theory and SVM algorithm. *Expert systems with Applications*. – 2010. – vol. 37. – pp. 1015-1022. (in English)
6. Fang Le, Yang Fan, Dong Wen, Guan Tong, Expectation propagation with stochastic kinetic model in complex interaction systems. *31st International Conference on Neural Information Processing Systems*. – 2017. – pp. 2026-2036. (in English)
7. Menyaylenko O. S., Zakhozhay O. I., Synthesis fundamentals of classifiers for technical systems of patterns recognition with the use of human's models of emotional processes. *Scientific Bulletin of National Mining University*. – 2015. – vol. 1 (145), – pp. 120-126. (in Ukrainian)
8. Yang Fan, Liu Bo, Dong Wen, Optimal Control of Complex Systems through Variational Inference with a Discrete Event Decision Process. *18th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*. – 2019. – pp. 296-304. (in English)
9. Zhuravlev Yu. I., Ryazanov V. V., Senko O. V., Recognition. *Mathematical methods. Program System. Practical using*. Moscow: Phazis, 2005 – 159 p. (in Russian)
10. Niemann H., Zhuravlev Yu., Gourevitch I., Laptev I., Pattern recognition and image understanding. Amsterdam: IOS Press, 2000. – 340 p. (in English)
11. Barabash Yu. L., Collective statistic solving in time recognition. Moscow: Radio and communication, 1983. – 224 p. (in Russian)
12. Gorelik A. L., Skripkin V. A., Recognition methods. Ed. 2. Moscow: High School, 1984. – 219 p. (in Russian)
13. Garcia-Pedrajas N., Ortiz-Boyer D., Improving multicast pattern recognition by the combination of two strategies. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 2006. – vol. 28. – pp. 1001-1006. (in English)
14. Eduard C. Popovici, Liviu A. Stancu, Ovidiu G. Guta, Stefan C. Arseni, Octavian Fratu, Combined use of pattern recognition algorithms for keystroke-based continues authentication system. *10th International Conference on Communications (COMM)*. – 2014. – pp. 91-109. (in English) DOI: 10.1109/ICComm.2014.6866686

15. Tsyppin Ya. Z., Base of information technology of identification. Moscow: Science, 1984. – 520 p. (in Russian)
16. Zakhzhay O. I., Menyaylenko A. S., Lyfar V. A., Separate Analysis of Informational Signs in Multi-Parametric Combined Patterns Recognition Systems. *Problemele Energeticii Regionale*. – 2019. – vol. 1-1 (40), – pp. 60-68. (in Russian) DOI: 10.5281/zenodo.3239140
17. Zakhzhay O. I., Joint analysis of informational signs in multi-parametric combined patterns recognition systems. *Electrotechnical and computer systems*. – 2019. – vol. 29 (105). – pp. 78-86. (in Ukrainian)
18. Zakhzhay O. I., Lyfar V. O., Ivanov V. G., The data consolidation and decision making by the ranking of groups with identical classification in hybrid recognition systems. *Electrotechnical and computer systems*. – 2019. – vol. 31 (107). – pp. 95–103. (in Ukrainian)
19. Zakhzhay O. I., Criteria for the determination of informativity and patterns ranking for making decisions in multi-parametric combined recognition systems. *Electrotechnical and computer systems*. – 2015. – vol. 27 (103). – pp. 196-204. (in Ukrainian)
20. Zakhzhay O. I., Lyfar V. O., Baturin O. I., The decision making by the finding of groups with identical classification in multiparametric combined patterns recognition systems. *Bulletin of Volodymyr Dahl East Ukrainian University*. – 2019. – vol. 9 (249). – pp. 36-42. (in Ukrainian)
21. Cherkassky V., Mulier F., Vapnik-Chervonenkis (VC) learning theory and its applications. *IEEE Transactions on Neural Networks*. – 1999. – vol. 10. – iss. 5. – pp. 985-987. (in English) DOI: 10.1109/TNN.1999.788639
22. Devroye L., Györfi L., Lugosi G., Vapnik-Chervonenkis Theory. A Probabilistic Theory of Pattern Recognition. *Stochastic Modelling and Applied Probability*. – 1996. – vol. 31. – pp. 187-213. (in English) DOI: 10.1007/978-1-4612-0711-5\_12
23. Zakhzhay O. I., The concept of improving the theoretical and methodological foundations of synthesis information technologies for automated information processing and complex systems controlling. *Bulletin of Volodymyr Dahl East Ukrainian University*. – 2018. – vol. 6 (246). – pp. 49-55. (in Ukrainian)
24. Menyaylenko O. S., Zakhzhay O. I., The combined systems of patterns recognition in monitoring of temperature's spatial distribution for coke pie. *Electrotechnical and computer systems*. – 2017. – vol. 12 (88). – pp. 147-154. (in Ukrainian)
25. Menyaylenko A. S., Zakhzhay O. I., The information technology of automated data processing in the multi-channel ultrasonic measurement systems. *Research Bulletin of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"*. – 2014. – vol. 6 (98). – pp. 62-67. (in Ukrainian)
26. Menyaylenko O. S., Zakhzhay O. I., Bidyuk P. I., The text-unique verification reliability increasing by using of combined patterns recognition systems. *System research and information technologies*. – 2017. – vol. 4. – pp. 29-37.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Симанков В. С. Адаптивное управление сложными системами на основе теории распознавания образов / В. С. Симанков, Е. В. Луценко. – Краснодар: Техн. унив. Кубан. гос. технол. унив., 1999. – 318 p.
2. Leigh W. Forecasting the NYSE composite index with technical analysis, pattern recognizer, neural network, and genetic algorithm: a case study in romantic decision support / W. Leigh, R. Purvis, J. M. Ragusa // *Decision Support Systems*. – 2002. – vol. 32, – pp. 361-377.
3. Yang-Yu Liu. Control principles of complex systems / Liu Yang-Yu, Barabasi Albert-Laszlo // *Review of modern physics*. – 2016. – vol. 88. – iss. 3., – 58 p. DOI: 10.1103/RevModPhys.88.035006.

4. Kyriakos G. Vamvoudakis. Control of complex systems / G. Vamvoudakis Kyriakos, Jagannathan Sarangapani // Elsevier Inc., 2016. – 762 p. DOI:10.1016/C2015-0-02422-4
5. Wen Q. Automatic stock decision support system based on box theory and SVM algorithm / Q. Wen, Z. Yang, Y. Song, P. Jia // Expert systems with Applications. – 2010. – vol. 37. – pp. 1015-1022.
6. Fang Le. Expectation propagation with stochastic kinetic model in complex interaction systems / Le Fang, Fan Yang, Wen Dong, Tong Guan // 31st International Conference on Neural Information Processing Systems. – 2017. – pp. 2026-2036.
7. Меняйленко О. С. Основи синтезу класифікаторів технічних систем розпізнавання образів з використанням моделей емоційних процесів людини / О. С. Меняйленко, О. І. Захожай // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2015. – № 1 (145). – С. 120-126.
8. Yang Fan. Optimal Control of Complex Systems through Variational Inference with a Discrete Event Decision Process / Fan Yang, Bo Liu, Wen Dong // 18th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. – 2019. – pp. 296-304.
9. Журавлев Ю.И. Математические методы. Программная система. Практические применения / Ю.И. Журавлев, В. В. Рязанов, О. М. Сенько. – Москва: Фазис, 2005. – 159 с.
10. Niemann H. Pattern recognition and image understanding. / H. Niemann, Yu. Zhuravlev, I. Gourevitch, I. Laptev. Amsterdam: IOS Press, 2000. – 340 p.
11. Барабаш Ю. Л. Коллективные статистические решения при распознавании / Ю. Л. Барабаш. – Москва: Радио и связь. – 1983. – 224 с.
12. Горелик А. Л., Скрипкин В. А. Методы распознавания. Изд. 2 / А. Л. Горелик, В. А. Скрипкин. – Москва: Высшая школа, 1984. – 219 p.
13. Garcia-Pedrajas N. Improving multicast pattern recognition by the combination of two strategies / N. Garcia-Pedrajas, D. Ortiz-Boyer // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2006. – vol. 28. – pp. 1001-1006.
14. Eduard C. Popovici. Combined use of pattern recognition algorithms for keystroke-based continuous authentication system / C. Popovici Eduard, A. Stancu Liviu, G. Guta Ovidiu, C. Arseni Stefan, Fratu Octavian // 10th International Conference on Communications (COMM). – 2014. – pp. 91-109. DOI: 10.1109/ICComm.2014.6866686
15. Ципкин, Я. З. Основы информационной технологии идентификации / Я. З. Ципкин. – Москва: Наука, 1984. – 520 p.
16. Захожай О. И. Раздельный анализ информационных признаков в многопараметрических комбинированных системах распознавания образов / О. И. Захожай, А. С. Меняйленко, В. А. Лыфарь // Проблемы региональной энергетики. – 2019. – № 1-1 (40). – С. 60-68. DOI: 10.5281/zenodo.3239140
17. Захожай О. І. Спільний аналіз інформаційних ознак в багатопараметричних комбінованих системах розпізнавання образів / О. І. Захожай // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2019. – № 29 (105). – С. 78-86.
18. Захожай О. І. Консолідація даних і прийняття рішень на основі ранжування груп ідентичних класифікацій в гібридних системах розпізнавання / О. І. Захожай, В. О. Лифар, В. Г. Иванов // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2019. – № 31 (107). – С. 95-103.
19. Захожай О. І. Критерії визначення інформативності та ранжування образів при прийнятті рішень в багатопараметричних комбінованих системах розпізнавання / О. І. Захожай // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2015. – № 27 (103). – С. 196-204.
20. Захожай О. І. Прийняття рішень на основі пошуку груп ідентичних класифікацій в багатопараметричних комбінованих системах розпізнавання образів / О. І. Захожай, В. О. Лифар, О. І. Батурін // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2019. – № 9 (250). – С. 36-42.



21. Cherkassky V. Vapnik-Chervonenkis (VC) learning theory and its applications / V. Cherkassky, F. Mulier // IEEE Transactions on Neural Networks. – 1999. – vol. 10. – iss. 5. – pp. 985-987. DOI: 10.1109/TNN.1999.788639
22. Devroye L. Vapnik-Chervonenkis Theory. A Probabilistic Theory of Pattern Recognition / L. Devroye, L. Györfi, G. Lugosi // Stochastic Modelling and Applied Probability. – 1996. – vol. 31. – pp. 187-213. DOI: 10.1007/978-1-4612-0711-5\_12
23. Захожай О. І. Концепція вдосконалення теоретико-методологічних основ синтезу інформаційних технологій автоматизованої обробки інформації і управління складними системами / О. І. Захожай // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2018. – № 6 (246). – С. 49-55.
24. Меньяйленко О. С. Комбіновані системи розпізнавання образів при аналізі просторового розподілу температури коксового пирога / О. С. Меньяйленко, О. І. Захожай // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2013. – № 12 (88). – С. 147-154.
25. Меньяйленко О. С. Інформаційна технологія автоматизованої обробки даних в багатоканальних системах ультразвукового вимірювання / О. С. Меньяйленко, О. І. Захожай // Наукові вісті Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”. – 2014. – № 6 (98). – pp. 62-67.
26. Меньяйленко О. С. Підвищення достовірності перевірки унікальності текстів шляхом використання комбінованих систем розпізнавання образів / О. С. Меньяйленко, О. І. Захожай, П. І. Бідюк // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2017. – № 4. – С. 29-37.

*Received on 01.10.2019.*

# МАТЕМАТИЧНІ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ МОДЕЛІ В ЕКОНОМІЦІ

УДК 651.4.9 : 004

<http://orcid.org/0000-0002-4473-6816>  
<http://orcid.org/0000-0001-9891-5417>

**Ю. Л. ТИХОНОВ, С. К. ПОЛУМІЄНКО**

## ІНДИКАТОРИ ТА ІНДЕКСИ РІВНЯ РОЗВИТКУ ОСВІТИ

***Анотація.** На основі аналізу систем індикаторів міжнародних організацій, окремих країн, рейтингів ВНЗ України виявлено сучасні тенденції розвитку системи базисних індикаторів.*

*Зокрема, розглядалися індикатори, які використовують організації PISA, ПРООН, “Комісія Стігліца”, “Комісія Всесвітньої організації охорони здоров’я” країн Канада, Корея, Нова Зеландія, Японія. Аналізувалися національні рейтинги ВНЗ “Освіта.іа”, “Топ-200 Україна”, “Бал ЗНО на контракт” тощо. В результаті проведених досліджень встановлено, що питання оцінки ефективності функціонування закладів освіти як системного організаційно-економічного механізму слабо висвітлені і практично не розроблені. Необхідно створювати інструментарій, який включає засоби оцінки рівня електронної освіти, ефективного створення складових електронної освіти. Наукова новизна отриманих результатів полягає в аналізі можливостей використання індикаторів для електронної освіти. Практична значимість отриманих результатів визначається можливістю їх застосування при вирішенні задач визначення оптимальних інвестицій в освіту по регіонах країни.*

***Ключові слова:** освіта, електронна освіта, рейтинг, індикатори, рівень освіти, системи індикаторів, PISA, ПРООН, “Комісія Стігліца”, “Освіта.іа”, “Топ-200 Україна”.*

**DOI: 10.35350/2409-8876-2019-17-4-26-40**

### Вступ

Сьогодні загальновизнано, що знання є рівноцінним чинником виробництва разом з капіталом і робочою силою. Країна, яка прагне побудувати орієнтоване на інтереси людей, відкрите для всіх і направлене на розвиток інформаційне суспільство, повинна мати певний рівень освіти, зокрема, електронної (е-) освіти [1-2]. У найближчій перспективі здатність освіти відповідати науково-технічним, соціально-культурним, економічним і технологічним реаліям існування світу визначатимуть такі поняття, як ефективність, наявність або відсутність потенціалу розвитку, чітке бачення стратегічних орієнтирів і тактичних завдань.

Коректна оцінка якості освіти – складне завдання, яке вимагає всебічного розгляду безлічі чинників та вже багато років вирішується найбільшими міжнародними організаціями. Зокрема, ООН, починаючи з 90-х років, щорічно публікує Індекс розвитку людського капіталу HDI (Human Development Index), важливим компонентом якого є оцінка рівня освіти [3], те ж робиться Організацією економічного співробітництва і розвитку [4].

Мета цієї роботи – розглянути підходи до використання індикативного аналізу процесів освіти, оцінки ефективності функціонування закладів освіти як системного організаційно-економічного механізму.

## 1. Міжнародні дослідження систем індикаторів та індексів рівня розвитку освіти

Швидкі зміни в науково-технічному і економічному середовищі все більше обумовлюють виклик існуючим освітнім системам. Одержання знань на всіх рівнях – це важливий компонент, який дозволяє населенню країни брати участь в прогресі, пропонованому технологічними перетвореннями. Роль науки і освіти для економічного процвітання очевидна. Суспільство не може отримати користь з досягнень в науці та техніці без безперервного постачання добре освічених учених та інженерів. У цьому сенсі спроби кількісно виміряти результати освіти з погляду соціальних вимог відіграють важливу роль.

Для аналізу взаємного розвитку освіти та соціально-економічної системи вводяться системи показників – індикаторів, які дозволяють оцінити рівень освіти, знайти слабкі місця, які потрібно розвивати.

Один з найпростіших індексів освіти  $I_{осв}$  [5] поєднує рівень грамотності серед дорослого населення та сукупної частки учнів у системі початкової, середньої та вищої освіти –

$$I_{осв} = 2/3 * I_{зр} + 1/3 * I_{уч},$$

де  $I_{зр}$ ,  $I_{уч}$  – відповідно індекс грамотності серед дорослого населення та індекс сукупної частки учнів.

Організація економічного співробітництва і розвитку (ОЕСР) пропонує систему базисних індикаторів [4], згрупованих в чотири тематичні групи, в кожній з яких від 6 до 15 показників (табл. 1):

- група А: інформація про тих, хто навчається, що впливає на успішність їх навчання і як успішність навчання впливає на їх успішність на ринку праці;
- група В: інформація про інвестиції в освіту;
- група С: інформація про навчання впродовж життя та навчання для професійного розвитку;
- група D: інформація про освітнє середовище.

Таблиця 1 – Індикатори рівня освіти ОЕСР

Група індикаторів А	
Індикатор	Характеристика індикатора
A1	До якого віку навчаються дорослі?
A2	Як багато учнів закінчують базову школу?
A3	Як багато учнів закінчують старшу школу?

Продовження таблиці 1

Індикатор	Характеристика індикатора
A4	Які очікування учнів щодо освіти?
A5	Яке ставлення учнів до математики?
A6	Як впливає на успішність навчання іммігрантів?
A7	Чи впливає на успішність навчання у старшій школі соціально-економічний статус батьків учнів?
A8	Як впливає навчання дорослих на їх успішність на ринку праці?
A9	Які економічні переваги дає освіта?
Група індикаторів В	
B1	Яка сума витрачається на учня?
B2	Яка частина валового національного продукту витрачається на освіту?
B3:	Яка сума приватних та громадських інвестицій у систему освіти?
B4:	Яка загальна сума у країні витрачається на освіту?
B5	Яка платня студентів ВНЗ за навчання і які громадські субсидії вони отримують?
B6	На які послуги й освітні ресурси витрачається фінансування освіти?
B7	Наскільки ефективні витрати суспільства на освіту?
Група індикаторів С	
C1	Наскільки розповсюдженими є професійні освітні програми?
C2	Хто користується професійними освітніми програмами?
C3	Хто навчається за кордоном і де саме навчається?
C4	Наскільки успішним є перехід студентів від навчання до професійної роботи?
C5	Чи беруть участь у тренінгах і навчанні працюючі?
Група індикаторів D	
D1	Скільки часу проводять учні в класах?
D2	Яким є співвідношення учні/вчитель і наскільки великими є класи?
D3	Яка заробітна платня вчителя?
D4	Скільки годин учитель навчає?
D5	Як школи здійснюють моніторинг своєї роботи?

Ці індикатори використовуються для порівняння рівня освіти різних країн. Однак, вони не забезпечують аналізу взаємного розвитку освіти і соціально-економічної системи країни, оцінки рівня освіти по її регіонах.

Наприклад [6], індикатор A3 показує поточний випуск випускників повних середніх навчальних закладів. Використовуються типові вікові коефіцієнти для розрахунку всіх випускників за міжнародною стандартною класифікацією освіти ISCED (International Standard Classification of Education).

Індикатор A8 відображає чисту приведену вартість (Net Present Value, *NPV*), яка є традиційним критерієм для визначення ефективності інвестицій. Тут *NPV* є мірою економічної вигоди, отриманої протягом трудового життя людини в результаті отримання вищих рівнів освіти:

$$NPV = -\sum_{t=0}^{d-1} C_t / (1+i)^t + \sum_{t=d}^{64-a-d} B_t / (1+i)^t,$$

де  $C_t$  – витрати в період  $t$  ( $t \in 0, d-1$ ),  $B_t$  – вигоди в період  $t$  ( $t \in d, 64-a-d$ ),  $i$  – ставка дисконтування (обліковий відсоток), при якій майбутні витрати та вигоди оцінюються сьогодні,  $d$  – тривалість навчання (в роках),  $a$  – вік на початку навчання,  $64$  – вік в останній рік на ринку праці. Ставка дисконтування встановлюється на рівні 3% [4].

До витрат відносяться втрачений заробіток та витрати на навчання. Втрачені доходи – це заробіток, який було б одержано, якби людина працювала на нижчому рівні освіти замість того, щоб вкладати кошти в освіту. До вигод, навпаки, – збільшення рівня заробітку та менша ймовірність бути безробітним в результаті більш високого рівня освіти,

Індикатор A9 [7] відображає соціально-економічне становище студентів й вимірюється за допомогою індексу економічного, соціального та культурного статусу (Index of Economic, Social and Cultural Status, *ESCS*), створеного в межах Програми [8] оцінювання іноземних студентів PISA (Programme for International Student Assessment).

Індекс *ESCS* розраховується на основі наступних трьох індексів.

1. Найвищий професійний статус батьків *HISEI* (Highest Occupational Status of Parents).

2. Вища освіта батьків, виражена в тривалості років навчання *PARED* (Highest Parental Education).

3. Домашнє володіння *HOMEPOS* (Home Possessions).  
При цьому

$$ESCS = \frac{\beta_1 HISEI + \beta_2 PARED + \beta_3 HOMEPOS}{\varepsilon_f},$$

де  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  – це вагові коефіцієнти індексів *HISEI, PARED* і *HOMEPOS* [9].

В PISA для визначення  $\varepsilon_f$  використовується метод головних компонент. Їх обчислення може бути зведене до обчислення власних значень коваріаційної матриці вихідних даних [8-9].

Багато індикаторів освіти використовуються для моніторингу в програмі «Цілей Сталого Розвитку» [11], зокрема:

- позашкільні діти;
- процент новачків;
- загальна кількість нових учнів в першому класі початкової освіти;
- набір в першому класі за офіційним віком вступу;
- кількість учнів у вищій освіті на 100 000 жителів;
- розподіл навчання в освіті по кожному типу програм освіти;
- загальний коефіцієнт охоплення;
- коефіцієнт зарахування для певного рівня освіти;
- загальний коефіцієнт випуску початкової освіти;
- доросла та молодіжна грамотність;
- державні витрати на освіту;
- державні витрати на певному рівні ISCED;

- поточні витрати на учня у відсотках від валового національного доходу;
- відношення кількості учителів та учнів;
- відсоток жінок-вчителів та ін.

**Індикатори освіти PCEIP в Канаді.** Підтримується порівняння освіти у канадських провінціях та територіях з країнами-членами ОЄСР. Показники в **PCEIP** охоплюють широкий спектр даних в освіті, включаючи п'ять основних галузей [12-13].

1. Населення шкільного віку.
2. Фінансування систем освіти.
3. Початкова середня освіта.
4. Післядипломна освіта.
5. Переходи до вищої освіти та на ринку праці.

У **Кореї** проводиться дослідження фактичного стану навчання протягом усього життя [14-15]. Мета обстеження – створити національну систему навчання впродовж життя як двигун для розвитку суспільства, зібрати наукові та об'єктивні дані та забезпечити основні показники.

Використовуються наступні показники (табл. 2-5).

Таблиця 2 – Умови участі в освіті

Категорія	Опис
А. Формальна освіта	A1. Статус участі.
	A1-1. Участь у навчальному курсі.
	A1-2. Соціальний стан в момент участі.
	A2. Мета участі.
	A3. Річний час участі.
	A4. Витрати на самофінансування навчання та зовнішню підтримку.
В. Неформальна освіта	A5. Результат навчання.
	V1. Статус участі.
	V2. Кількість учасників програми.
	V3-(1). Тип програм участі.
	V3-(2). Досвід участі в минулому.
	V3-(3). Формат програми.
	V3-(4). Тип закладу.
	V3-(5). Назва установи.
	V3-(6). Мета участі.
	V3-(7). Статус припинення.
	V3-(8). Фактори припинення.
	V3-(9). Річний час участі.
	V3-(10). Витрати на самофінансування навчання.
	V3-(11). Стан зовнішньої підтримки витрат на навчання.
	V3-(12). Підтримка витрат на навчання.
V3-(13). Статус придатності до сертифікації.	
V3-(14). Задоволення програмою.	
V3-(15). Фактори незадоволення програмою.	
V4. Результат навчання.	
С. Неформальне навчання	C1. Статус участі.

Таблиця 3 – Середовище освіти

D. Навчальний попит	D1. Надія на майбутню участь.
	D2. Фактори не участі.
E. Доступність	E1. Статус доступу до інформації.
	E1-1. Спосіб доступу до інформації.
	E1-2. Участь у програмі використання інформації.

Таблиця 4 – Навчальна діяльність

F. Компетентність навчання	F1. Вивчення іноземної мови за досвідом та рівнем.
	F2. Частота використання іноземних мов.
	F3. Частота використання Інтернету.
G. Шаблон навчання	G1. Шаблон навчання.
H. Ставлення до навчання	H1. Ставлення до навчання.

Таблиця 5 – Соціальна участь і усвідомлення

I. Соціальна участь	II. Статус та частота участі в соціальній діяльності.
J. Соціальне усвідомлення	J1. Загальна задоволеність життям.
	J2. Покращення якості життя.
	J3. Удосконалення якості життя через участь у процесі навчання протягом усього життя.

Також розглядаються додаткові питання до наведених таблиць.

**У Новій Зеландії** формальна освіта є обов'язковою для осіб у віці від 6 до 16 років. Використовуються наступні показники [16], що відносяться до вищої освіти (табл. 6).

Таблиця 6 – Індикатори вищої освіти

№	Показник	Опис
1	Доступність вищої освіти для студентів.	Відношення середніх витрат на навчання до середньої щотижневої заробітної плати для штатного працівника. Цей показник також розглядає зміни середньої річної суми, запозиченої студентами, та середній баланс студентського кредиту.
2	Завершення вищої кваліфікації.	Цей показник показує, скільки людей закінчує кваліфікацію щорічно і рівень, на який люди закінчують кваліфікацію.
3	Премія за кваліфікаційним рівнем.	Це додаткова сума, зароблена людьми з кваліфікацією, як відсоток від заробітку людей без кваліфікації.
4	Освіта дорослого населення.	Розподіл населення віком 15 років і старше за найвищою кваліфікацією. Індикатор також включає міжнародне порівняння рівня освіти населення у віці від 25 до 64 років.

Продовження таблиці 6

№	Показник	Опис
5	Державне фінансування вищої освіти.	Цей показник включає в себе номінальні та скориговані з урахуванням інфляції державні витрати на вищу освіту.
6	Середній прибуток за кваліфікаційним рівнем.	Середні погодинні і щотижневі доходи від заробітної плати для населення у віці 15 років і старше.
7	Участь у промисловій підготовці.	Цей показник розглядає кількість зайнятих, які укладають індивідуальну угоду про навчання, часто як частину трудового договору, який визначає їхні навчальні програми та цілі.
8	Рівні участі у ВНЗ.	Частка учасників вищої освіти у ВНЗ для населення у віці від 16 років до 64 років.
9	Ступінь завершення досліджень.	Кількість докторських ступенів, закінчених в університетах на 100 штатних еквівалентних академічних працівників.
10	Ставлення студентів до науки.	Ставлення студентів до науки на основі дослідження Програми міжнародної оцінки студентів (PISA).
11	Вища освіта випускників до вищого рівня.	Цей показник показує, скільки людей продовжують вчитися після отримання кваліфікації.
12	Ступінь тривалості утримання студентів.	Частка студентів, які почали здобувати кваліфікацію і все ще навчаються.
13	Загальні державні витрати на освіту.	Загальні державні інвестиції в освіту.
14	Рівні безробіття за кваліфікаційним рівнем.	Рівень безробіття визначається як кількість безробітних, виражених у відсотках до робочої сили.
15	Дохід від зовнішнього дослідження університету.	Цей показник враховує дохід університету від зовнішніх досліджень з урахуванням інфляції та дохід від зовнішнього дослідження університету як відсоток від загального операційного доходу.
16	Результати досліджень університету.	Відсоток науково-дослідних працівників університету (еквівалент повної зайнятості), які отримали категорію якості А або В.

Як і вище, використовуються додаткові показники.

**В Японії** просувається освіта в межах Цілей Сталого Розвитку ООН, підтримується забезпечення якісної освіти та сприяння навчання протягом усього життя [17]. Використовуються індикатори ОЕСР та ООН [3-4], які згадувалися вище, зокрема витрати на освіту, математична, письмова, наукова грамотність, молодь, яка не працює і не вчиться.



Відповідно до програм «Європейське соціальне дослідження», «Міжнародна соціальна програма» та ін. збираються дані про три соціальні результати (самооцінка здоров'я, політичний інтерес і міжособова довіра) [18-20].

Також дедалі частіше замість традиційних економічних вимірювань, таких як дохід, зайнятість і ВВП на душу населення, розглядаються неекономічні аспекти – соціальний прогрес, задоволеність життям, цивільна активність і здоров'я [11].

**Індекс глобальних знань GKI** (Global Knowledge Index) спрямований на вимірювання багатовимірної концепції знань [21-22], яка часто пов'язується з такими поняттями, як «економіка знань» або «суспільство знань».

**GKI** має ієрархію з чотирьох рівнів, яка відноситься до шести галузевих субіндексів, які мають вагу 15 відсотків, та, крім цього, субіндексу загального середовища, що має вагу 10 відсотків.

Субіндекси Індексу GKI:

- доузізвської освіти (Pre-University Education);
- технічної професійної освіти та навчання (Technical Vocational Education and Training);
- вищої освіти (Higher Education);
- інформаційно-комунікаційних технологій (ICT);
- економіки (Economy);
- досліджень, розробок та інновацій (RDI);
- середовища забезпечення освіти (General Enabling Environment).

Для розрахунку всіх складових показників використана формула:

$$CI = \sum_{j=1}^n w_j \times SI_j$$

де  $w_j$  – відносна вага субіндексів  $SI_j$ ;  $n$  – їх кількість в композитному індексі.

Перший із субіндексів – доузізвської освіти – складається з двох основних елементів (капітал знань та середовище для освіти) та відображає прихильність до забезпечення справедливої якісної освіти і просування можливостей навчання впродовж усього життя.

Субіндекс технічної професійної освіти та навчання (ТПО), пов'язаний з одержанням знань і навичок для сфери праці, вимірюється UNESCO [23]. Згідно з рекомендаціями Третього міжнародного конгресу з ТПО [24-25] відповідні індикатори повинні враховувати:

- поліпшення відповідності;
- розширення доступу та поліпшення якості та охоплення (включаючи учнів з обмеженими можливостями, маргінальне і сільське населення, мігрантів), покращення гендерної рівності;
- розвиток шляхів накопичення індивідуальних знань і умінь;
- вдосконалення доказової бази – посилення основ і інструментів для поліпшення збору кількісних і якісних даних.

Зазначається, що аналіз індексу ТПО допомагає прив'язати внутрішні процеси до зовнішніх очікувань, розробити відповідні внутрішні заходи з підвищення якості та ефективності ТПО [26]. Це дозволить розробити більш

адекватні навчальні плани, які збільшують ймовірність працевлаштування [27]. Індекс складається з двох основних елементів – освіта та професійна підготовка та особливості ринку праці.

Субіндекс вищої освіти включає багато інформації, але відзначається [22] відсутність доступних даних, особливо з якості системи вищої освіти, капіталу знань випускників та виробництва знань у вищих навчальних закладах. Індекс складається з двох основних компонентів – внесок у вищу освіту та результати і якість вищої освіти, які у свою чергу включають декілька індикаторів.

Субіндекс досліджень, розробок та інновацій складається з трьох основних компонент – НДР і дослідно-конструкторські роботи, інновації у виробництві та соціальні інновації, які включають, зокрема, такі індикатори:

- валові витрати на НДР та дослідно-конструкторські розробки;
- валовий внутрішній продукт;
- міноритарні інвестори;
- паритет купівельної спроможності;
- чисельність персоналу;
- прями іноземні інвестиції та передача технологій.

Індекс інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) ґрунтується на тім, що вони відіграють важливу роль у підтримці просування знань у всіх секторах. Для країн важливо використовувати показники, які кількісно визначають рівень розвитку ІКТ [22].

Основний фактор в оцінці – це готовність країни повною мірою використовувати переваги, надані ІКТ. Для досягнення збалансованого зростання у всіх областях і серед всіх соціальних верств економіка повинна забезпечити ефективну, комплексну інфраструктуру, яка підтримує виробництво знань і пов'язаних з ними цифрових контентів за доступними цінами.

ІКТ-індекс складається з двох основних компонент – вкладення в ІКТ і результати ІКТ та подальшої сукупності обраних індикаторів.

Субіндекс економіки. Економіка знань є основним фактором сталого розвитку, створення матеріальних цінностей, а також нових робочих місць в різних галузях економіки. На відміну від традиційної концепції аналізу економічних ресурсів та доступності, економіка знань базується, насамперед, на забезпеченні економічних ресурсів, зокрема людських ресурсів, інструментів знань, у тому числі цифрових та технологічних знань, а також інноваційних та творчих навичок. Вона складається з трьох основних напрямків: конкурентоспроможність знань, економічна відкритість, фінансування та додана вартість [22].

Субіндекс економіки базується на групі показників, які сильно впливають на шість інших показників Глобального індексу знань, та включає три елементи – фінансування і додана вартість; економічна відкритість; конкурентоспроможність знань.

Індекс середовища забезпечення освіти додано для підтримки 6 галузевих індексів, оскільки вони залежать від низки факторів – політичних, соціально-економічних, здоров'я людини та навколишнього середовища [22].

## 2. Деякі національні дослідження

Ресурсом «Освіта.ua» [28] складено рейтинг вищих навчальних закладів (ВНЗ) України за 2018 р. (табл. 7). Для цього використані рейтинги навчальних закладів України: «Топ-200 Україна», «Scopus» і «Бал ЗНО на контракт» [28, 29], кожен з яких використовує різні критерії оцінювання ВНЗ.

Методика «Топ-200 Україна» базується на використанні даних прямих вимірювань та експертних оцінок. Діяльність ВНЗ оцінюється за допомогою інтегрованого індексу, який включає три комплексні субіндекси: якості науково-педагогічного потенціалу, якості навчання та міжнародного визнання. Рейтинг «Scopus» ґрунтується на показниках бази даних Scopus з відстеження цитування наукових статей, опублікованих навчальним закладом або його працівниками. Рейтинг «Бал ЗНО на контракт» ґрунтується на середньому балі зовнішнього незалежного оцінювання абітурієнтів попереднього року, які зараховані на навчання за кошти фізичних і юридичних осіб.

Таблиця 7 – Рейтинг вузів України

Назва навчального закладу	Місце в загальному рейтингу	Топ-200 Україна	Scopus	Бал ЗНО на контракт	Підсумок
Київський національний університет імені Тараса Шевченка	1	1	1	3	5
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна	2	3	2	10	15
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»	3	1	6	9	16
Львівський національний університет імені Івана Франка	4	10	3	6	19
Національний університет «Львівська політехніка»	5	5	9	12	26
Національний університет «Києво-Могилянська академія»	6	12	18	2	38

Також існують інші підходи до визначення оцінок ВНЗ [30, 31], в [32], зокрема, пропонуються критерії оцінки науково-педагогічних працівників, основні категорії оцінок представлені в наступній таблиці.

Таблиця 8 – Показники оцінювання роботи науково-педагогічних працівників ВНЗ України

Вид роботи
Підготовка проектних заявок (пропозицій) для участі у конкурсах:
Підготовка та укладання угоди на виконання госпдоговірної НДР
Стажування у закордонних ВНЗ або наукових установах в межах індивідуального гранту
Отримання нагород за наукові досягнення:
Керівництво науково-дослідною темою кафедри, якій присвоєно номер держреєстрації, та виконання якої здійснюється в межах 6-годинного робочого дня
Підготовка до захисту та захист кандидатської (докторської) дисертації
Написання, оформлення, видання (перевидання)
Підготовка та видання наукової статті
Доповіді на наукових заходах із публікацією матеріалів та тез:
Участь у роботі наукових заходів
Підготовка проекту та укладання міжнародного договору
Оформлення заявки на отримання патенту/корисної моделі
Отримання патенту/корисної моделі
Рецензування монографії, підручника, навчального посібника
Рецензування статей
Рецензування дисертації, автореферату дисертації та її опонування
Науково-виробнича перевірка та впровадження наукових розробок
Участь в наукових експедиціях
Участь у виставках наукових досягнень:
Керівництво науково-дослідною роботою студентів:
Підготовка студентів до участі у конкурсах
Керівництво науковою роботою студентів, які здобули перемогу
Звіт про науково-дослідну роботу кафедри

В чомусь схожа методика оцінювання використовується в НАН України [33].

## Висновки

В основному проблематикою оцінювання рівня освіти займаються міжнародні організації, якими створені достатньо широкі системи індикаторів та інтегральні індекси, спрямовані на вирішення завдань цих організацій. Це, з одного боку, робить ці системи досить узагальненими, що має забезпечити порівняння по різних країнах світу. З іншого боку, саме це робить ці системи недостатньо придатними для порівняльного аналізу розвитку освіти в окремій країні та її регіонах.

В той же час, ці системи не надають яких-небудь рекомендацій щодо підвищення рівня освіти, залишаючи проблеми її розвитку на відповідний національний розсуд. Це цілком відповідає необхідності врахування національної специфіки, самостійності та можливості вирішення близьких проблем.

Наприклад, як свідчить аналіз, принципи організації та фінансового забезпечення загальної освіти є стандартними. Проте, при рівних умовах якість освітніх послуг, що надаються різними освітніми установами, можуть суттєво відрізнятися.

Не менш важливими є питання ефективності діяльності органів освіти та їх фінансування. Як зазначається в [34], за існуючими індикаторами неможливо визначити ефективність державних програм в галузі освіти, це ж частково відноситься й до ВНЗ; незважаючи на порівняно з країнами ЄС великі кошти, які витрачаються на освіту, рівень ВНЗ істотно інший. Це призводить до незадоволення абітурієнтів та студентів національними закладами та пошуку освіти за кордоном, також це не сприяє якості робочої сили, підвищення продуктивності праці. Обумовлене це й не врахованими демографічними та іншими факторами впливу на освіту та одержані студентами в результаті знання та навички.

Як зазначалося, зараз електронна освіта стала однією з актуальних форм освіти. Перелічені вище проблеми відносяться й до неї, але в цій сфері взагалі немає навіть визнаних міжнародних систем індикаторів, методологій оцінювання.

Тобто, необхідно створювати інструментарій, який включає засоби ефективного створення складових електронної освіти, оцінки її рівня та порівняння по регіонах країни та з міжнародним рівнем її розвитку та застосування.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Global Sustainable Development Report. Executive Summary: Building the Common Future We Want. New York: United Nations Department of Economic and Social Affairs, Division for Sustainable Development. 2013. URL: <http://sustainabledevelopment.un.org/globalsdreport>.
2. Полумієнко С.К., Рибаків Л.О. Індикативний аналіз сталості технологічного розвитку // За редакцією член-кореспондента НАН України Довгого С.О. К.: Логос, 2015. 191 с.
3. Human Development Indices and Indicators 2018 Statistical Update. URL: [http://hdr.undp.org/sites/default/files/2018\\_human\\_development\\_statistical\\_update.pdf](http://hdr.undp.org/sites/default/files/2018_human_development_statistical_update.pdf)
4. OECD. Education at a Glance 2018: OECD Indicators. URL: <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/eag-2018-en.pdf?expires=1551775704&id=id&accname=guest&checksum=8E62648D1E080B61281E8CA95D2FC7E3>
5. Measuring Sustainable Development, United Nations Economic Commission for Europe New York and Geneva, 2009. URL: [http://unstats.un.org/unsd/broaderprogress/pdf/Measuring\\_sustainable\\_development%20%28UNECE,OECD,Eurostat%29.pdf](http://unstats.un.org/unsd/broaderprogress/pdf/Measuring_sustainable_development%20%28UNECE,OECD,Eurostat%29.pdf).
6. Полумієнко С.К., Рибаків Л.О., Грінченко Т.О. ІТ-проекція технологічного розвитку України. За редакцією Довгого С.О. – К.: Азимут-Україна, 2011. – 184 с.
7. Education at a Glance 2014: OECD Indicators. Indicator A9. URL: [http://www.oecd.org/education/EAG2014-Indicator\\_A9\(eng\).pdf](http://www.oecd.org/education/EAG2014-Indicator_A9(eng).pdf).

8. PISA-based Test for Schools Technical Report (Draft). URL: <http://www.oecd.org/pisa/aboutpisa/PISA-based%20Test%20for%20Schools%20Technical%20Report%20-%20OECD%202015%20-%20draft.pdf>.
9. Scaling Procedures and Construct Validation of Context Questionnaire Data. URL: [https://www.oecd.org/pisa/pisaproducts/PISA%202012%20Technical%20Report\\_Chapter%2016.pdf](https://www.oecd.org/pisa/pisaproducts/PISA%202012%20Technical%20Report_Chapter%2016.pdf).
10. Handbook of research method and application. URL: <https://books.google.com.ua/books?id=4RWIDQAAQBAJ&pg=PA285&lpg=PA285&dq=Principal+components+analysis+indicators+eigenvalue&source=bl&ots=awAnZLQVaE&sig=ACfU3U3pTevnNkEHmt-yE-2WdsT1kTZrgw&hl=ru&sa=X&ved=2ahUKEwjyqv qpp7HhAhV8w8QBHZXEax4 Q6AEwAAnoECAGQAQ#v=onepage&q=Principal%20 components%20 analysis%20indicators%20eigenvalue&f=true>.
11. Report by the Commission on the Measurement of Economic Performance and Social Progress. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/118025/118123/Fitoussi+ Commis sion+ report>
12. Council of Ministers of Education, Canada. URL: <https://www.cmec.ca/259/Programs-and-Initiatives/Education-Data--Research/Indicators/index.html>.
13. Complete List of Pan-Canadian Education Indicators Program tables. URL: <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/81-582-x/2016001/tbl-eng.htm>.
14. Обстеження соціального капіталу Кореї (KEDI) 2008 року. URL: <http://cesi.kedi.re.kr/>.
15. Survey on Actual Condition of Individual's Lifelong Learning. – <http://cesi.kedi.re.kr/eng/stats/intro?menuCd=0107&survSeq=2018&itemCode=01>.
16. Indicators. URL: <https://www.educationcounts.govt.nz/statistics/indicators>.
17. Japan's Voluntary National Review. URL: <https://www.mofa.go.jp/files/000287390.pdf>.
18. Європейське соціальне дослідження (ESS). URL: <http://www.europeansocialsurvey.org/>.
19. Міжнародна соціальна програма (ISSP). URL: <http://www.issp.org/>.
20. Національне обстеження здоров'я населення США (NHIS). URL: [http://www.cdc.gov/nchs/nhis/about\\_nhis.htm/](http://www.cdc.gov/nchs/nhis/about_nhis.htm/).
21. Global Knowledge Index 2017. URL: [http://knowledge4all.com/uploads/files/KI2017/Summary\\_en.pdf](http://knowledge4all.com/uploads/files/KI2017/Summary_en.pdf)
22. Global Knowledge Index. Methodology. URL: <http://knowledge4all.com/Methodology.aspx?language=en>
23. Promoting learning for the world of work. URL: <https://unevoc.unesco.org/go.php?q=What+is+TVET>.
24. Shanghai Consensus. Recommendations of the Third International Congress on Technical and Vocational Education and Training 'Transforming TVET: Building skills for work and life. URL: [https://unevoc.unesco.org/fileadmin/user\\_upload/docs/Shanghai\\_Consensus.pdf](https://unevoc.unesco.org/fileadmin/user_upload/docs/Shanghai_Consensus.pdf).
25. Technical Vocational Education and Training Index. URL: [http://www.knowledge4all.com/uploads/files/AKI2015/PDFEn/AKI2015\\_Ch3\\_En.pdf](http://www.knowledge4all.com/uploads/files/AKI2015/PDFEn/AKI2015_Ch3_En.pdf).
26. Proposed Indicators for Assessing Technical and Vocational Education and Training. Inter-Agency Working Group on TVET Indicators. URL: [https://www.etf.europa.eu/sites/default/files/m/E112211E42995263C12579EA002EF821\\_Report%20on%20indicators%20April%202012.pdf](https://www.etf.europa.eu/sites/default/files/m/E112211E42995263C12579EA002EF821_Report%20on%20indicators%20April%202012.pdf).
27. Vocational Education. The Missing Link in Economy Development. URL: <https://www.bcg.com/documents/file117152.pdf>.
28. Освіта.ua . URL: <https://ru.osvita.ua/vnz/rating/51741/>.
29. Рейтинг вищих навчальних закладів «Топ-200 Україна» 2017/2018 рік. URL: <http://www.eurosvita.net/index.php/?category=1&id=5647>.
30. Згуровський М. Визначення університетських рейтингів – складова євроінтеграції в освітній сфері. Дзеркало тижня. Україна, № 28, 2006. С. 10–13.
31. Ямковий В. Ранжування університетів – крок до відкритості та прозорості вищої освіти. Освіта України. Україна, № 42, 5 червня 2007. С. 4–7.

32. Положення про оцінювання роботи науково-педагогічних працівників кафедри та визначення їхніх рейтингів. Національний університет «Львівська політехніка». URL: <http://www.lp.edu.ua/polozhennya-pro-ocinyvannya-roboty-naukovo-pedagogichnyh-pracivnykiv>.
33. Методика оцінювання ефективності діяльності наукових установ Національної академії наук України. URL: [http://www.nas.gov.ua/text/pdfNews/metodyka\\_text.pdf](http://www.nas.gov.ua/text/pdfNews/metodyka_text.pdf).
34. Репко М., Руда Ю. Освіта по-українськи: 129 мільярдів – марнотратство чи інвестиція? URL: <https://www.epravda.com.ua/publications/2017/02/15/620955/>.

## REFERENCES

1. Global Sustainable Development Report. Executive Summary: Building the Common Future We Want. New York: United Nations Department of Economic and Social Affairs, Division for Sustainable Development. 2013. Retrieved from <http://sustainabledevelopment.un.org/globalsdreport>.
2. Polumiienko S.K., Rybakov L.O. Indykatyvnyy analiz stalosti tekhnolohichnoho rozvytku. [Indicative analysis of the constancy of technological development]. Za redaktsiyeyu chlen-korespondenta NAN Ukrayiny Dovhoho S.O. K.: Logos, 2015. 191 p. (In Ukrainian).
3. Human Development Indices and Indicators 2018 Statistical Update. Retrieved from [http://hdr.undp.org/sites/default/files/2018\\_human\\_development\\_statistical\\_update.pdf](http://hdr.undp.org/sites/default/files/2018_human_development_statistical_update.pdf)
4. OECD. Education at a Glance 2018: OECD Indicators. Retrieved from <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/eag-2018-en.pdf?expires=1551775704&id=id&accname=guest&checksum=8E62648D1E080B61281E8CA95D2FC7E3>
5. Measuring Sustainable Development, United Nations Economic Commission for Europe New York and Geneva, 2009. Retrieved from [http://unstats.un.org/unsd/broaderprogress/pdf/Measuring\\_sustainable\\_development%20%28UNECE,OECD,Eurostat%29.pdf](http://unstats.un.org/unsd/broaderprogress/pdf/Measuring_sustainable_development%20%28UNECE,OECD,Eurostat%29.pdf).
6. Polumiienko, S. K., Rybakov, L.O., Grinchenko, T.O. Za redakciej Dovgogo, C.O. (2011). IT-proekcija tekhnolohichnoho rozvytku Ukrainy. [IT-projection of technological development of Ukraine]. K.: Azimut- Ukraina, 184 p. (In Ukrainian).
7. Education at a Glance 2014: OECD Indicators. Indicator A9. Retrieved from [http://www.oecd.org/education/EAG2014-Indicator A9 \(eng\).pdf](http://www.oecd.org/education/EAG2014-Indicator A9 (eng).pdf).
8. PISA-based Test for Schools Technical Report (Draft). Retrieved from <http://www.oecd.org/pisa/aboutpisa/PISA-based%20Test%20for%20Schools%20Technical%20Report%20-%20OECD%202015%20-%20draft.pdf>.
9. Scaling Procedures and Construct Validation of Context Questionnaire Data. Retrieved from [https://www.oecd.org/pisa/pisaproducts/PISA%202012%20Technical%20Report\\_Chapter%2016.pdf](https://www.oecd.org/pisa/pisaproducts/PISA%202012%20Technical%20Report_Chapter%2016.pdf)
10. Handbook of research method and application. Retrieved from <https://books.google.com.ua/books?id=4RWIDQAAQBAJ&pg=PA285&lpg=PA285&dq=Principal+component+s+analysis+indicators+eigenvalue&source=bl&ots=awAnZLQVae&sig=ACfU3U3pTevnNkEHmt-yE-2WdsT1kTZrgw&hl=ru&sa=X&ved=2ahUKEwjyqvpp7HhAhV8w8QBHZXEAx4Q6AEwAuoECAGQAQ#v=onepage&q=Principal%20components%20analysis%20indicators%20eigenvalue&f=true>.
11. Report by the Commission on the Measurement of Economic Performance and Social Progress. Retrieved from <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/118025/118123/Fitoussi+Commission+report>.
12. Council of Ministers of Education, Canada. Retrieved from <https://www.cmec.ca/259/Programs-and-Initiatives/Education-Data--Research/Indicators/index.html>.
13. Complete List of Pan-Canadian Education Indicators Program tables. Retrieved from <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/81-582-x/2016001/tbl-eng.htm>.
14. Обстеження соціального капіталу Кореї (KEDI) 2008 року. Retrieved from <http://cesi.kedi.re.kr/>.

15. Survey on Actual Condition of Individual's Lifelong Learning. – <http://cesi.kedi.re.kr/eng/stats/intro?menuCd=0107&survSeq=2018&itemCode=01>.
16. Indicators. Retrieved from <https://www.educationcounts.govt.nz/statistics/indicators>.
17. Japan's Voluntary National Review. Retrieved from <https://www.mofa.go.jp/files/000287390.pdf>.
18. Yevropeys'ke sotsial'ne doslidzhennya (ESS). [European Social Study (ESS)]. Retrieved from <http://www.europeansocialsurvey.org/>. (In Ukrainian).
19. Mizhnarodna sotsial'na prohrama (ISSP). [International Social Program (ISSP)] Retrieved from <http://www.issp.org/>. (In Ukrainian).
20. Natsional'ne obstezhennya zdorov'ya naseleennya SSHA (NHIS) [National Health Survey (NHIS)]. Retrieved from [http://www.cdc.gov/nchs/nhis/about\\_nhis.htm/](http://www.cdc.gov/nchs/nhis/about_nhis.htm/).
21. Global Knowledge Index 2017. Retrieved from [http://knowledge4all.com/uploads/files/KI2017/Summary\\_en.pdf](http://knowledge4all.com/uploads/files/KI2017/Summary_en.pdf).
22. Global Knowledge Index. Methodology. Retrieved from <http://knowledge4all.com/Methodology.aspx?language=en>.
23. Promoting learning for the world of work. Retrieved from <https://unevoc.unesco.org/go.php?q=What+is+TVET>.
24. Shanghai Consensus. Recommendations of the Third International Congress on Technical and Vocational Education and Training 'Transforming TVET: Building skills for work and life. Retrieved from [https://unevoc.unesco.org/fileadmin/user\\_upload/docs/Shanghai\\_Consensus.pdf](https://unevoc.unesco.org/fileadmin/user_upload/docs/Shanghai_Consensus.pdf).
25. Technical Vocational Education and Training Index. Retrieved from [http://www.knowledge4all.com/uploads/files/AKI2015/PDFEn/AKI2015\\_Ch3\\_En.pdf](http://www.knowledge4all.com/uploads/files/AKI2015/PDFEn/AKI2015_Ch3_En.pdf).
26. Proposed Indicators for Assessing Technical and Vocational Education and Training. Inter-Agency Working Group on TVET Indicators. Retrieved from [https://www.etf.europa.eu/sites/default/files/m/E112211E42995263C12579EA002EF821\\_Report%20on%20indicators%20April%202012.pdf](https://www.etf.europa.eu/sites/default/files/m/E112211E42995263C12579EA002EF821_Report%20on%20indicators%20April%202012.pdf).
27. Vocational Education. The Missing Link in Economy Development. Retrieved from <https://www.bcg.com/documents/file117152.pdf>.
28. Osvita.ua . Retrieved from <https://ru.osvita.ua/vnz/rating/51741/>.
29. Reytynh vyshchyykh navchal'nykh zakladiv «Top-200 Ukrainya» 2017/2018 rik [The rating of higher educational institutions "Top 200 Ukraine" 2017/2018 year]. Retrieved from <http://www.euroosvita.net/index.php/?category=1&id=5647>.
30. Zgurovskij, M. Vyznachennya universytetskyh rejtingiv – skladova evrointegracii v osvithnij sferi [The definition of university rankings is a component of European integration in the educational sphere]. Dzerkalo tygnya - Ukraina, № 28, 2006. P. 10-13.
31. Ямковий В. (2007). Ranguvannya universytetiv – krok do vidkrytosti ta prozorochti vyschoj osvity [Ranking of universities is a step towards openness and transparency in higher education] Osvita Ukrainy– Ukraina, No 42, 5 chervnya, 2007. P. 4-7.
32. Pologennya pro ocynuvannya roboty naukovo-pedagogichnyh pracivnykiv kafedry ta vyznachennya ihih rejtingiv. Nacionalnyj Universytet "Lvivska politehnika" Retrieved from <http://www.lp.edu.ua/polozhennya-pro-ocynuvannya-roboty-naukovo-pedagogichnyh-pracivnykiv>.
33. Методика оцінювання ефективності діяльності наукових установ Національної академії наук України. Retrieved from [http://www.nas.gov.ua/text/pdfNews/metodyka\\_text.pdf](http://www.nas.gov.ua/text/pdfNews/metodyka_text.pdf).
34. Repko M., Ruda Yu. Osvita po-ukrayins'ky: 129 mil'yardiv – marnotratstvo chy investytsiya? [Repko M., Ruda Yu., Education in Ukrainian: 129 billion – extravagance or investment?]. Retrieved from <https://www.epravda.com.ua/publications/2017/02/15/620955/>.

*Стаття надійшла до редакції 11.07.2019.*



**С. І. АЗАРОВ, В. Л. СИДОРЕНКО, О. С. ЗАДУНАЙ**

## **ПРИРОДНО-РЕСУРСНИЙ ПОТЕНЦІАЛ СТАЛОГО РОЗВИТКУ УКРАЇНИ ЯК НЕЛІНІЙНА ДИНАМІЧНА СИСТЕМА**

***Анотація.** Доведено, що у системі природно-ресурсного потенціалу сталого розвитку України комплементарно сполучуються стійкість і змінність як вбудовані механізми її розвитку в статичі та динаміці, забезпечення її самоорганізації і самовідновлення, кількісної і якісної трансформації. У статичі превалюють характеристики стійкості та тяжіння до стабільності і сталості. У динаміці основною характеристикою є змінність системи, відтворення стабільності, що детермінує (реагує) на процеси трансформації і розвитку її складових підсистем, потенційних можливостей (зміни ендегенного середовища), інститутів і інституцій, обмежувачів і стабілізаторів (зміни екзогенного середовища). Показано, що динамічний розвиток моделі відтворення економічних інтересів характеризується якісними змінами як у її структурі, механізмах, формах (ендегенному середовищі), так і якісними трансформаціями в екзогенному просторі.*

***Ключові слова:** сталий розвиток, стабільність, сталість, стійкість, змінність, самоорганізація, самовідновлення.*

**DOI: 10.35350/2409-8876-2019-17-4-41-49**

### **Вступ**

Глобальною стратегією розвитку України з метою створення підґрунтя для її подальшого поступального руху можна вважати парадигму сталого розвитку, що вимагає перегляду та зміни не лише у системі «людина – економіка – екологія», але й усвідомлення необхідності збереження природи для забезпечення існування наступних поколінь.

### **1. Мета дослідження**

Мета дослідження полягає в окресленні формування поняття «сталого розвитку природно-ресурсного потенціалу України» і визначення його системних характеристик (стабільність, сталість, стійкість, змінність, самоорганізація і самовідновлення) в процесі зміни ендегенного та екзогенного середовища.

### **2. Виклад основного матеріалу**

Поняття «природно-ресурсний потенціал сталого розвитку» стало наріжним каменем глобальної стратегії розвитку людства. Зміст поняття природно-ресурсного потенціалу сталого розвитку тривалий час обговорювався та уточнювався в міжнародних документах різного рівня: декларації першої

конференції ООН з навколишнього середовища (1972) [1], де було обґрунтовано зв'язок економічного та соціального розвитку з проблемами навколишнього середовища; доповідях Римського клубу, в яких набула чіткого окреслення ідея переходу цивілізації до стану глобальної динамічної рівноваги; звіті Всесвітньої комісії ООН з навколишнього середовища і розвитку (1987) [2]. Поступово в процесі обговорення й аналізу теорія і практика сталого розвитку природно-ресурсного потенціалу опинилися в центрі уваги вчених і політиків, як вітчизняних, так і закордонних.

Якщо ж звернутися до думки вітчизняних учених, то привертають увагу кілька визначень досліджуваного поняття. Перша редакція проекту «Концепції сталого розвитку України» [3]: «Сталий розвиток – це процес гармонізації продуктивних сил, забезпечення задоволення необхідних потреб всіх членів суспільства за умови збереження і поетапного відтворення цілісності природного середовища, створення можливостей для рівноваги між його потенціалом і вимогами людей усіх поколінь». Друга редакція документа з такою ж назвою [4]: «Сталий розвиток – це процес розбудови держави на основі узгодження і гармонізації соціальної, економічної та екологічної складових з метою задоволення потреб сучасних і майбутніх поколінь». На думку інших учених [5]: «Сталий розвиток – це послідовний процес визначення і досягнення суспільно узгоджених стратегічних цілей на основі таких механізмів регулювання і координації співвідношення екстенсивних та інтенсивних факторів розвитку, що мінімізуватимуть середньо- та довгострокові загрози для функціонування основних сфер людської діяльності (соціально-економічної, науково-технічної, культурної) і суспільного буття в цілому».

Спільним у наведених вище визначеннях є необхідність узгодження, врівноваження потреб з ресурсними й екологічними можливостями територій, а також такий розвиток суспільства та характер використання ним наявних ресурсів, який дає змогу задовольняти сьогоденні потреби, зберігає та забезпечує можливості забезпечення потреб прийдешніх поколінь (рис. 1).

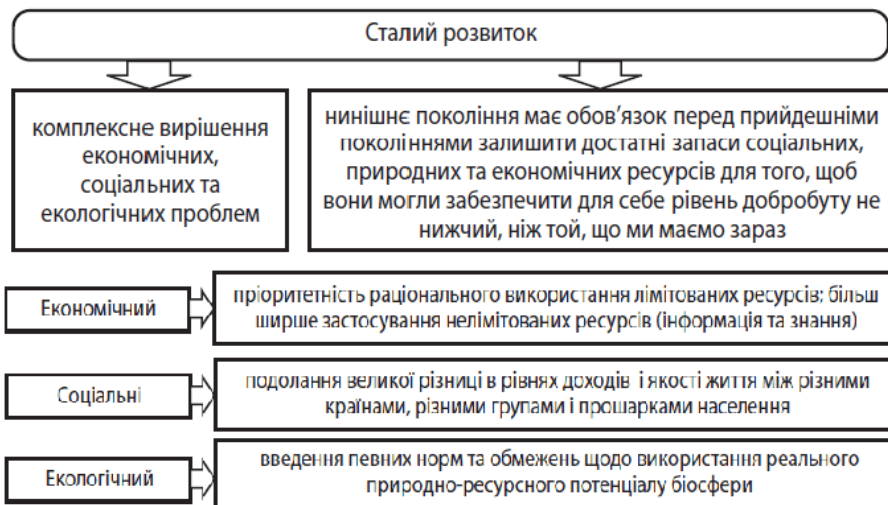


Рисунок 1 – Ключові аспекти сталого розвитку природно-ресурсного потенціалу

Можна стверджувати, що в ідеї сталого розвитку природно-ресурсного потенціалу здійснена спроба поєднати необхідність забезпечення задоволення зростаючих потреб людства не за рахунок збільшення обсягів використовуваних ресурсів, а за рахунок раціональності їх використання із одночасним зменшенням рівня забруднення навколишнього середовища.

Відповідно до принципів системного підходу та методу синергетики слід розглядати сталий розвиток природно-ресурсного потенціалу як складну нелінійну динамічну систему, в якій синтетично поєднуються елементи стійкості та змінності, еволюції і революції, статичності та динамічності, порядку і хаосу, ендо- та екзогенності тощо (рис. 2).

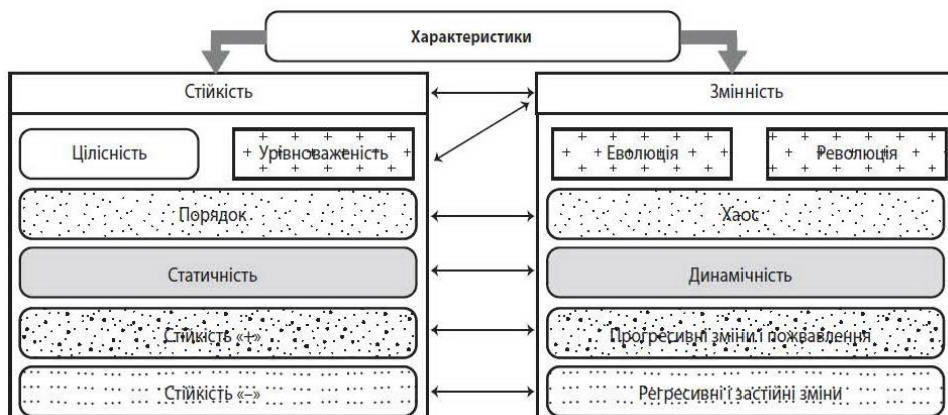


Рисунок 2 – Основні характеристики системи сталого розвитку природно-ресурсного потенціалу

Згідно з висновками Пригожина І., Стенгерса І. [6], родоначальників досліджень у сфері нерівноважної термодинаміки, змістовною характеристикою стійкості в динамічній нелінійній системі є її здатність до повернення або до зберігання і підтримання стаціонарного (збалансованого, поточного) стану, що притаманно системі формування, реалізації і подальшого відтворення сталого розвитку держави. Під таким кутом зору наявність стійкості розкривається, по-перше, у вихідних результатах функціонування зазначеної системи, у можливості підтримання її цілісності, структури, базових елементів, що дозволяє забезпечити подальше функціонування системи, її існування і збереження. По-друге, йдеться про стійкість у самому кругообігу сталого розвитку природно-ресурсного потенціалу. Коли траєкторія руху системи в процесі кругообігу незначно відрізняється від свого початкового стану або прагне до нього, зазначений рух системи є стабільно стійким. Коли система втрачає свою стійкість і все більше відхиляється від неї, стає нестійкою і знову прагне до отримання стійкості нового роду – це динамічна стійкість. Стійкими (стабільно незмінними) субстанціями сталого розвитку природно-ресурсного потенціалу є постійність вибору форм, інструментів і методів реалізації соціально-економічних і екологічних інтересів, сталість досягнутих даних показників у національній економіці, стабільність рівня задоволення наявних потреб, тобто непорушність кінцевих параметрів ефективності. Стійкість

відтворювальних трансформацій національних інтересів на макрорівні визначається безперервним підтриманням стабільності економічних відносин, що забезпечують на оптимальному (задовольняючому) рівні потреби в економічних і соціальних благах. У процесі генезису на фоні гомеостазу відбуваються поступально-еволюційні зміни у темпах формування і реалізації національних інтересів агентів (з'являються кількісні розриви) під впливом ендогенних та екзогенних чинників. Однак стійкість системних параметрів, зв'язків, відносин в цьому разі зберігається, підтримуються можливості самоорганізації, самовідтворення і самоупорядкування. На рис. 3 наведено поведінку поверхні рівноваги (або різноманіття) характеристик стійкості в динамічній нелінійній системі сталого розвитку природно-ресурсного потенціалу з її проекцією на площину  $ab$ , яка визначає управляючі параметри  $a$  та  $b$ .

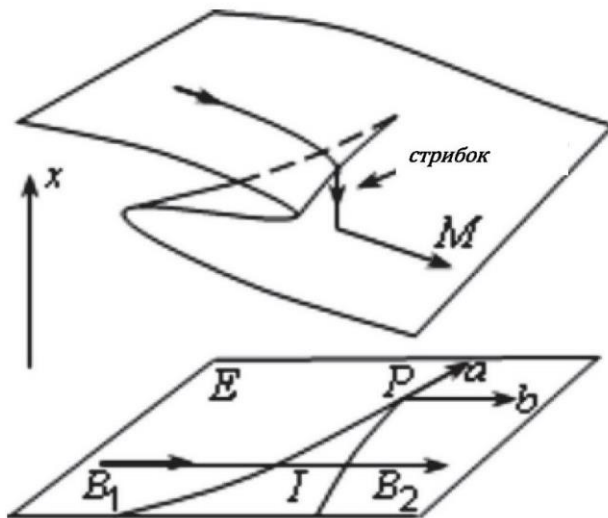


Рисунок 3 – Поведінка поверхні рівноваги характеристик стійкості в динамічній нелінійній системі сталого розвитку природно-ресурсного потенціалу та її проекція на площину

Точка  $(a, b)$ , повільно змінюючи свої координати  $a$  і  $b$ , описує деяку траєкторію на площині  $ab$ . Тоді положення рівноваги, що спостерігається, пройде шлях на поверхні  $M$ , що лежить над шляхом в площині  $ab$ . Через збірку на поверхні рівноваги  $M$  цьому шляху, можливо, доведеться перескакувати з одного аркуша поверхні на інший. Це пояснюється тим, що точки різноманіття  $M$ , розташовані на внутрішній поверхні складки, відповідають нестійкому стану системи. Такий дуже швидкий стрибок динамічної нелінійної системи настає тільки у разі виходу з області  $I$ , так як у системи не залишається іншого вибору (принцип максимального зволікання (perfect delay) Р. Тома [7]). Таким чином, поступові зміни управляючих параметрів  $a$  і  $b$  можуть спричинити за собою розривні зміни змінної стану  $x$ , викликаючи катастрофічні стрибки. Серед семи елементарних катастроф велике значення має катастрофа динамічної нелінійної системи, потенційна функція якої визначається рівнянням:

$$V_{ab}(x) = \frac{1}{4}x^4 + \frac{1}{2}ax^2 + bx. \quad (1)$$

Різноманіття катастрофи на поверхні рівноваги  $M$  (див. рис. 3) буде задаватися рівнянням:

$$0 = \frac{d}{dx}V_{ab}(x) = x^3 + ax + b. \quad (2)$$

Кубічне рівняння (2) має від одного до трьох дійсних коренів. Природа цих коренів залежить від дискримінанту:

$$D = 4a^3 + 27b^2. \quad (3)$$

Простір керуючих параметрів, що утворюють площину  $ab$ , будемо розбивати на п'ять підмножин:  $B_1, B_2, P, I, E$ , що зображені на рис. 4.

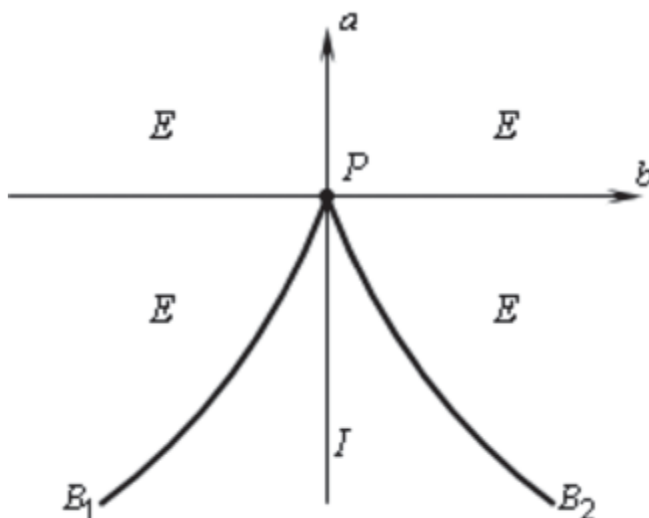


Рисунок 4 – Простір керуючих параметрів

Лінія, утворена множинами  $B_1, B_2$ , і  $P$ , відповідає умові  $D = 0$ , тобто  $4a^3 + 27b^2 = 0$ . В цьому разі, якщо  $a = 0$  і  $b = 0$ , то точка  $(a, b)$  лежить в  $B_1$  або в  $B_2$ , і рівняння (2) має три дійсних кореня, два з яких збігаються між собою. Точка  $P$  відповідає  $a = b = 0$  і є три співпадаючих дійсних кореня, рівних нулю. Точка  $P$  називається точкою повернення. Якщо  $(a, b) = I$ , то є три різних дійсних кореня і  $D < 0$ . Якщо  $(a, b) = E$ , то є тільки один речовий корінь ( $D > 0$ ).

Катастрофа відбувається, коли траєкторія точки  $(a, b)$  залишає область  $I$  і в цьому разі  $D$  змінює знак з негативного на позитивний. Вважаємо, що зміни керуючих параметрів в динамічній нелінійній системі сталого розвитку природно-ресурсного потенціалу є випадковими. Випадковими величинами або випадковими функціями також можна описувати вплив ендегенних та

екзогенних чинників. Для практичних цілей важливий статистичний аналіз положень рівноваги системи поблизу критичних точок. Тому вважаємо за доцільне розглянути з позицій теорії катастроф питання оцінки показників надійності системи за наявністю випадкових збурюючих факторів.

Розглянемо катастрофу динамічної нелінійної системи (рівняння (1)) із стохастичних позицій. Змінні управління  $a$  і  $b$  в загальному випадку змінюються в часі, і характеристика стану системи буде визначатися випадковим процесом  $D(t)$ . Таким чином, необхідно вирішувати задачу про викиди випадкового процесу в системі з області  $I$ . В цьому разі ймовірність виникнення катастрофи дорівнюватиме:

$$P(t) = P\{D(t) > 0\}. \quad (4)$$

Нехай  $D(t)$  – диференційований випадковий процес в системі дорівнює:

$$V(t) = \frac{dD(t)}{dt}. \quad (5)$$

Тоді, для того щоб випадковий процес в системі стався, необхідно, щоб відбулися дві події:

1) в момент часу  $t$ , що передує процесу, ордината  $D(t)$  повинна бути менше нуля ( $D(t) < 0$ );

2) в момент часу  $t + dt$ , наступний за моментом  $t$  (в той момент, коли відбудеться процес), ордината випадкової функції повинна бути позитивною, тобто  $D(t + dt) > 0$ .

Таким чином, для імовірності того, щоб випадковий процес в динамічній нелінійній системі сталого розвитку природно-ресурсного потенціалу стався в нескінченно малому інтервалі часу  $(t, t + dt)$ , необхідно, щоб:

$$P\{D(t) < 0; D(t + dt) > 0\} = p_0(t) dt, \quad (6)$$

де  $p_0(t)$  – тимчасова щільність імовірності.

Виразимо у виразі (6)  $D(t + dt)$  через  $D(t)$ . Для цього розкладемо  $D(t + dt)$  в ряд Тейлора в околиці точки  $t$ :

$$D(t + dt) = D(t) + \frac{dD(t)}{dt} dt + \dots \quad (7)$$

Звідси:

$$D(t + dt) \approx D(t) + V(t) dt > 0. \quad (8)$$

Після перенесення  $V(t)dt$  у праву частину нерівності отримаємо:

$$D(t) > 0 - V(t) dt. \quad (9)$$

З урахуванням залежності (6) –  $V(t)dt < D(t) < 0$  імовірність випадкового процесу в системі запишеться у вигляді:

$$P\{D(t) < 0; D(t + dt) > 0\} = P\{-V(t)dt < D(t) < 0\} = \int_0^{\infty} \int_{-vdt}^0 f(d; v; t) dddv. \quad (10)$$

Тут  $f(d, v; t)$  – двовимірний закон розподілу ординат  $D$  і швидкостей  $V$ . Після застосування теореми про середнє:

$$\int_{-vdt}^0 f(d; v; t) dd \approx vdt \cdot f(0, v; t), \quad (11)$$

отримаємо:

$$P\{-V(t)dt < D(t) < 0\} = dt \int_0^{\infty} f(0, v; t) v dt = p_0(t) dt. \quad (12)$$

Тут  $p_0(t) = \int_0^{\infty} f(0, v; t) v dv$  – тимчасова щільність для ймовірності випадкового процесу в системі.

Тимчасову щільність  $p_0(t)$  можна трактувати як середнє число перетинів випадковим процесом  $D(t)$  нульового рівня за одиницю часу. У загальному випадку середнє число перетинів рівня 0 за час  $\tau$  (математичне очікування числа процесів в системі) можна описати рівнянням:

$$N_+(t) = \int_0^{\tau} \int_0^{\infty} f(0, v; t) v dv dt = \int_0^{\tau} p_0(t) dt. \quad (13)$$

Для стаціонарного процесу щільність розподілу ординат і швидкостей не буде залежати від часу, тобто  $f(d, v; t) = f(d, v)$  і, отже,  $p_0(t) = p_0$ .

Звідси:

$$N_+(\tau) = \tau \cdot p_0. \quad (14)$$

Тоді ймовірність того, що реалізація випадкового процесу  $D(t)$  перетне нульовий рівень, можна представити у наступному вигляді (рис. 5).

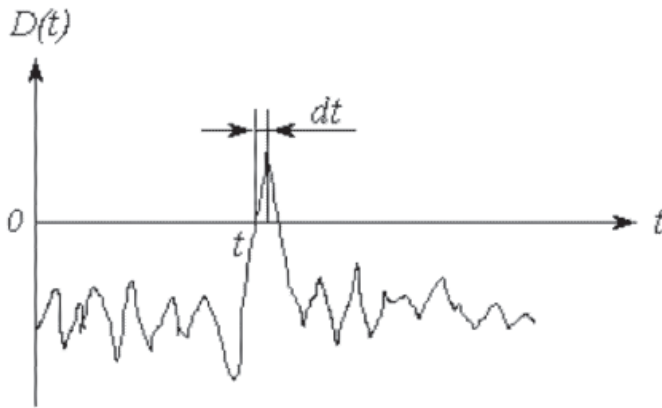


Рисунок 5 – Реалізація випадкового процесу  $D(t)$  в динамічній нелінійній системі сталого розвитку природно-ресурсного потенціалу

Отже, в процесі реалізації випадкового процесу  $D(t)$  в динамічній нелінійній системі сталого розвитку природно-ресурсного потенціалу поступово будемо спостерігати кумулятивний ефект кількісних змін, який матиме своїми наслідками посилення флуктуацій і ентропії. Останнє буде супроводжуватися тиском ендогенного й екзогенного середовища, відповідними змінами не тільки в кількісних, але й у якісних параметрах поведінки системи та механізмах її взаємодії. Спочатку система буде підтримувати відносно стійкий стан у зазначених умовах, однак у подальшому виникнення кумулятивного ефекту кількісних і якісних змін опосередковуватиме порушення стійкості системи та її перехід до нової фази – фази розвитку хаосу.

## Висновки

Підсумовуючи викладене, можна зробити висновок, що відповідно до системного підходу, принципів еволюціонізму та синергетики відтворення економічних інтересів є складною динамічною системою, в якій циклічна зміна стійких упорядкованих форм нестійкими дисипативними формами детермінує її еволюційний (революційний) розвиток, прогрес (регрес) у часі і просторі через механізми самоорганізації, когерентності і вибору хаотичного атрактору як нового потенційного вектору розвитку. У динаміці рекуренція процесів формування і реалізації економічних інтересів відбувається саме через нестійкість і невпорядкованість, в яких вбудований потенціал формування нового порядку – народження і становлення або падіння і краху системи відтворення економічних інтересів. Отже, змінність – це джерело її розвитку і детермінанта її динамічно-відтворювального потенціалу. Динамічний розвиток моделі відтворення економічних інтересів характеризується якісними змінами як у її структурі, механізмах, формах (ендогенному середовищі), так і якісними трансформаціями в екзогенному просторі.



## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Declaration of the United Nations Conference on the Human Environment // UN (1972). URL: <http://www.unep.org/documents.multilingual/default.asp?documentid=97&articleid=1503>.
2. Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future // UN (1987). URL: <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>.
3. Концепція сталого розвитку України / заг. кер.: Ю.І. Костенко, Б.Є. Патон. Київ: [б. в], 1997. 22 с.
4. Концепція сталого розвитку України: проект / заг. кер.: Б.Є. Патон, Ю.І. Самойленко, І.О. Заєць. Київ: [б. в], 2000. 18 с.
5. Семенюк Е.П. Філософські засади сталого розвитку. Львів: Афіша, 2002. 200 с.
6. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса: новый диалог человека с природой. М.: Прогресс, 1986. 432 с.
7. Thom R. Structural Stability and Morphogenesis: An Outline of a General Theory of Models. Reading, MA: Addison-Wesley, 1989. 321 p.

## REFERENCES

1. Declaration of the United Nations Conference on the Human Environment // UN (1972). URL: <http://www.unep.org/documents.multilingual/default.asp?documentid=97&articleid=1503>.
2. Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future // UN (1987). URL: <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>.
3. Kostenko Yu. I., Paton B. Ye. (1997). Kontseptsiya staloho rozvytku Ukrayiny. [Concept of sustainable development of Ukraine]. Kyiv. 22 p. (In Ukrainian).
4. B. Ye. Paton, Yu. I. Samoylenko, I. O. Zayets'. (2000). Kontseptsiya staloho rozvytku Ukrayiny: proekt. [Concept of sustainable development of Ukraine: project]. Kyiv. 18 p. (In Ukrainian).
5. Semenyuk E. P. (2002). Filososfs'ki zasady staloho rozvytku. [Philosophical foundations of sustainable development]. L'viv: Afisha. 200 p. (In Ukrainian).
6. Prigozhin I., Stengers I. (1986). Poryadok iz khaosa: novyy dialog cheloveka s prirodoy. [Order from chaos: a new dialogue between man and nature]. Moskva: Progress. 432 p. (In Russian).
7. Thom R. Structural Stability and Morphogenesis: An Outline of a General Theory of Models. Reading, MA: Addison-Wesley, 1989. 321 p.

*Стаття надійшла до редакції 18.06.2019.*

**Н.О. ТУЛЯКОВА, О.М. ТРОФИМЧУК**

## **МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ РЕНТГЕНІВСЬКОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ ТОМОГРАФІЇ**

**Анотація.** Рентгенівська комп'ютерна томографія – грандіозний за своєю значимістю винахід, який поєднує знаменне в історії науки відкриття рентгенівського випромінювання, праці геніального математика Й. Радона та сучасні науково-технічні досягнення в галузі фізики, електроніки та комп'ютерної техніки. Метою статті є створення теоретичних засад для науково-технічних досліджень та розробок у актуальному напрямі комп'ютерного покращення якості рентгенівських томографічних зображень та їх автоматизованого аналізу. У статті викладені математичні основи рентгенівської комп'ютерної томографії, що ґрунтуються на інтегральних перетвореннях Радона. Проведено огляд методів відновлення двовимірного томографічного зображення поперечного перерізу тривимірного об'єкту за проекціями. Стаття має теоретичний характер і може бути корисною математикам, фізикам, інженерам, програмістам та спеціалістам інших галузей.

**Ключові слова:** рентгенівська комп'ютерна томографія, перетворення Радона, синограма, реконструкція зображення.

**DOI: 10.35350/2409-8876-2019-17-4-50-66**

### **Вступ**

На початку статті наведемо ключові поняття, необхідні для розуміння принципу рентгенівської комп'ютерної томографії, математичної моделі, котра описує проекції рентгенівських променів, та математичних методів, на яких ґрунтуються алгоритми реконструкції томографічного зображення поперечний перерізу об'єкта за проекціями.

*Рентгенівське тіньове зображення* – сумарне зображення шарів тіла, що знаходяться на різних відстанях від плівки (чим більше щільність речовини, тим сильніше нею поглинається випромінювання й тим більше засвічується плівка). Але звичайні рентгенівські знімки мають істотний недолік, який полягає в нашаровуванні зображень, отже, у спотворенні або втраті їх просторового розташування.

*Комп'ютерна томографія (КТ)* – метод отримання зображення ізольованого шару об'єкта шляхом його просвічування рентгенівськими променями та вимірювання їх *проекцій* за допомогою лінійки фотодетекторів під різними кутами напрямку сканування (від грецької *tomos* – шар, переріз). При поширенні променя уздовж деякої лінії  $z$  хвиля взаємодіє з речовиною: згасає та змінює фазу. Функція  $f(x, y)$ , поставлена у відповідність кожній точці  $(x, y)$  на площині, характеризує *абсорбцію* (поглинання) променя речовиною, пропорційну її щільності, та / або *фазовий зсув* хвилі.

*Проекція* – вектор інтенсивностей рентгенівських променів, які пройшли через тонкий поперечний шар об'єкта, зареєстрований лінійкою фотодетекторів на приймальному боці. Кожен такий промінь на виході з об'єкту є акумульованим (інтегральним) значенням функції зображення  $f(x, y)$  уздовж траєкторії проходження променя крізь об'єкт, що *моделюється перетворенням Радона двовимірної функції  $f(x, y)$  уздовж деякої похилої лінії*.

Метод отримання КТ зображення поперечного шару об'єкта полягає в реєстрації під різними кутами напряму рентгенівських променів проекцій, що характеризують абсорбцію випромінювання речовиною, або в отриманні проекцій у результаті застосування алгоритмів відновлення фази за даними вимірювань, і в подальшій реконструкції за проекціями зображення.

Зондувальна система з джерел випромінювання і відповідної лінійки детекторів на протилежному боці обертається навколо об'єкта – у такий спосіб при різних кутах випромінювання  $\alpha$  реєструються проекції, що формують *синограму*<sup>1</sup> зображення поперечного шару об'єкта. Само зображення невідоме, проте можливе вимірювання проекцій променів, пониклих крізь поперечний шар об'єкта під різними кутами  $\alpha$ . Лінійки джерел і відповідних приймачів випромінювання обертаються в площині досліджуваного поперечного шару. За синограмою при допомозі математичних методів відновлюється КТ зображення перерізу, що сканувався. По сукупності отриманих таким чином за допомогою матриці фотодетекторів паралельних КТ зображень поперечних шарів об'єкта можна реконструювати тривимірний (3D) об'єкт.

Мета статті полягає у висвітленні математичних методів рентгенівської комп'ютерної томографії, що є теоретичним підґрунтям для розв'язування актуальних науково-технічних завдань у сфері комп'ютерної обробки цифрових зображень, таких як: фільтрація шуму та артефактів у даних томографічних досліджень, реконструкція зображень, покращення їх якості, відповідно, й об'єктивності аналізу, візуалізація внутрішньої структури об'єкту, моделювання імплантів, моніторинг функціонування внутрішньої системи без втручання в її цілісність задля виявлення дефектів, патологій, сторонніх тіл, та, відповідно, підвищення достовірності діагностики, та ін.

## 1. Перетворення Радона

Математичні основи КТ закладені ще задовго до появи рентгенівських установок у 1917 році австрійським ученим *Йоганном Радонам*, який запропонував *метод відновлення багатовимірних функцій за їхніми інтегральними характеристиками* [1]. Хоча за життя цього видатного математика його наукові праці не отримали належного визнання у зв'язку з відсутністю практичного застосування, більш ніж через півстоліття зі створенням перших рентгенівських комп'ютерних томографів практична значимість цих робіт стала неоціненною.

Теоретичні аспекти КТ висвітлені в багатьох джерелах [2-9]. Інтерес до даної тематики обумовлений актуальністю, всебічним застосуванням і перспективністю розвитку в різних галузях науки і техніки.

---

<sup>1</sup> *Синограма* – двовимірний розподіл одновимірних проекцій поперечного перерізу об'єкта як функція кута проекцій. Кут проекцій розташований по осі ординат. Лінійна проекція розташована по осі абсцис.

Принцип отримання проєкційних даних для реконструкції томографічного зображення перерізу об'єкта ілюструється на рисунку 1.

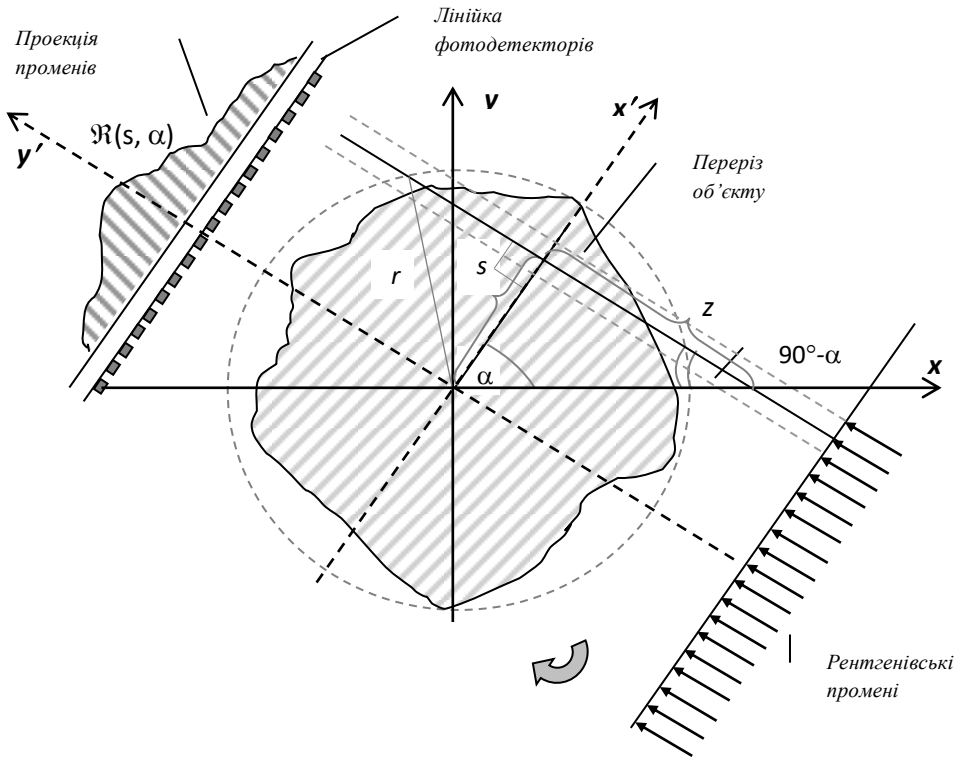


Рисунок 1 – Схема отримання проєкцій

Нехай об'єкт, що досліджується, просвічується паралельним пучком добре сфокусованих рентгенівських променів, що проникають через поперечний шар об'єкта (рис.1). На протилежному боці знаходяться приймачі випромінювання (фотодетектори), що реєструють випромінювання на виході з об'єкта – проєкцію при певному куті  $\alpha$ .

Перетворення Радона (ПР)  $\mathfrak{R}(k, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, kx+b)dx$  неперервної

функції  $f(x, y)$  – це інтеграл значень  $f(x, y)$  уздовж деякої прямої лінії  $y = kx + b$ , де  $k, b$  – коефіцієнти,  $\mathfrak{R}(\cdot)$  – символ ПР.

У нормальному вигляді ПР записується так:

$$\mathfrak{R}(s, \alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(s - x \cos \alpha - y \sin \alpha) dx dy, \quad (1)$$

де  $x \cos \alpha + y \sin \alpha - s = 0$  – нормальне рівняння прямої;  $(x, y)$  – точка на прямій у декартовій (прямокутній) системі координат;  $s$  – відстань від начала координат до прямої (координата променя / фотодетектора);  $\alpha$  – кут між

віссю  $x$  та перпендикуляром, опущеним на пряму з початку координат;  $\delta(\cdot)$  – дельта-функція Дирака.

Випромінювання  $\mathfrak{R}(s, \alpha)$ , що реєструється елементарним приймачем (фотодетектором), називається *радоновським образом*, а перетворення (1) – *перетворенням Радона*.

Розглянемо систему координат  $OX'Y'$ , отриману поворотом осей координат  $OXY$  на кут  $\alpha$  (рис.1). Формули повороту системи координат такі:

$$\begin{cases} x = x' \cos \alpha - y' \sin \alpha; \\ y = x' \sin \alpha + y' \cos \alpha \end{cases} \quad (2)$$

де  $(x, y)$  – координати точки у вихідній системі координат  $OXY$ ;  $(x', y')$  – координати цієї точки в системі координат  $OX'Y'$ , що повернуто на кут  $\alpha$ .

Рівняння прямої  $z$  в новій системі координат  $OX'Y'$  має вигляд:  $x' - s = 0$  (рис.1). Підставляючи  $x' = s$  в (2), а формули (2) в формулу ПР (1), та,

враховуючи фільтруючу властивість  $\delta$ -функції ( $\int_{-\infty}^{\infty} f(x) \delta(x - x_0) = f(x_0)$ ,

$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) \delta(0) = f(x)$ ), маємо *одновимірне ПР* у такому вигляді<sup>1</sup>:

$$\begin{aligned} \mathfrak{R}(s, \alpha) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(s \cos \alpha - y' \sin \alpha, s \sin \alpha + y' \cos \alpha) dy' = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f(s \cos \alpha - z \sin \alpha, s \sin \alpha + z \cos \alpha) dz, \end{aligned} \quad (3)$$

Таким чином, на виході з об'єкту фотодетекторами реєструються променеві суми, що є *радоновськими образами*  $\mathfrak{R}(s, \alpha)$ , які утворюють *проекцію*  $p(s, \alpha) = \mathfrak{R}(s, \alpha)$  (3) при заданому куті повороту  $\alpha$ . Радоновський образ являє собою інтегральне значення поглинання рентгенівського випромінювання речовиною та / або фазового зсуву хвилі в кожній точці на прямій поширення променя. Проекції  $p(s, \alpha)$  – це одновимірні функції від  $s$ , що знаходяться при можливих значеннях кута  $\alpha$  і для тих значень  $s$ , для яких функція плоского зображення  $f(x, y) \neq 0$ . У результаті формується *синограма*<sup>1</sup> поперечного перерізу, крізь який пройшли рентгенівські промені.

У реальності величина  $s$  обмежена фізичними розмірами об'єкту, а кут  $\alpha$  вимірюється від  $0$  до  $180^\circ$ , адже при зміні кута на  $180^\circ$  просвічування ведеться у зворотному напрямку, тобто  $\mathfrak{R}(s, \alpha) = \mathfrak{R}(-s, \alpha + \pi)$ . Для зручності

<sup>1</sup> Пара дійсних чисел  $(s, \alpha)$  з області визначення радоновських образів  $\mathfrak{R}(s, \alpha)$  не може розглядатися як точка на площині в полярній системі координат. Це пояснюється тим, що умова  $f(0, \alpha_1) = f(0, \alpha_2)$  для будь-яких кутів  $\alpha_1, \alpha_2$ , що справедлива в полярній системі координат, у загальному випадку для радоновських образів не виконується, тобто  $\mathfrak{R}(0, \alpha_1) \neq \mathfrak{R}(0, \alpha_2)$  для  $\alpha_1 \neq \alpha_2$ , оскільки  $\mathfrak{R}(0, \alpha_1), \mathfrak{R}(0, \alpha_2)$  – це інтеграли, обчислені вздовж прямих, що проходять через початок координат під різними кутами  $\alpha_1, \alpha_2$ .

вводиться окружність радіуса  $r$ , що охоплює поперечний переріз об'єкта (рис.1). Тоді інтеграл (3) набуває вигляду

$$\mathfrak{R}(s, \alpha) = \int_{-\sqrt{r^2-s^2}}^{\sqrt{r^2-s^2}} f(s \cos \alpha - z \sin \alpha, s \sin \alpha + z \cos \alpha) dz. \quad (4)$$

На рисунку 2 наведено приклад двовимірної функції  $f(x, y)$  та її ПР  $\mathfrak{R}(s, \alpha)$  в аналітичній формі, де рис.2 а) – функція  $f(x, y) = \frac{1}{(1+x^2)(1+y^2)}$ ;

рис.2 б) – ПР вказаної функції  $\mathfrak{R}(s, \alpha) = \frac{2\pi(s + \cos \alpha/2)}{-3\cos^2 \alpha + 4s \cos \alpha + 4s^2 + 4}$ ,  $s > 0$ ,

$|\alpha| \leq \frac{\pi}{2}$ . Отримати ПР в аналітичній формі можливо тільки в окремих випадках. На практиці маємо справу тільки з *дискретними функціями*. Як

зазначалося вище, у КТ двовимірна функція зображення  $f(x, y)$  шару, що просвічується, невідома, а результати вимірювань при різних кутах повороту  $\alpha$  моделюються ПР  $\mathfrak{R}(s, \alpha)$  цієї функції. Завдання полягає у відновленні за даними вимірювань (проекціями) функції зображення перерізу, тобто математично – у знаходженні зворотного ПР  $\mathfrak{R}^{-1}(\mathfrak{R}(s, \alpha))$ .

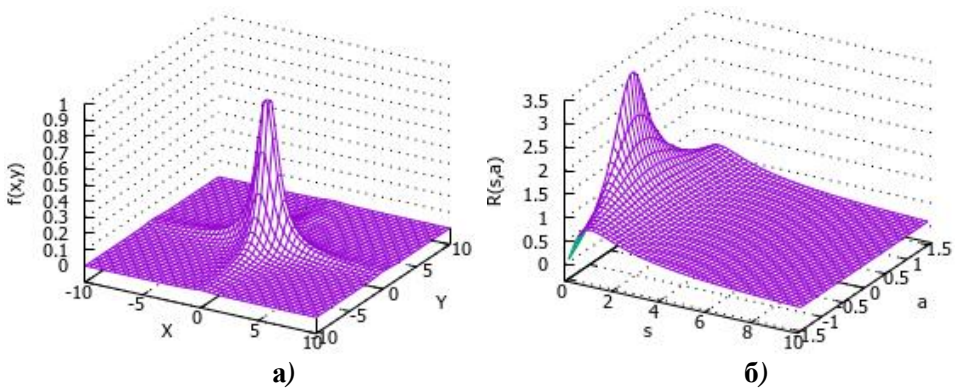


Рисунок 2 – Приклад двовимірної функції та її перетворення Радона:  
а) функція; б) перетворення Радона

У КТ двовимірне цифрове зображення поперечного перерізу об'єкта зазвичай являє собою функцію інтенсивності в дискретному двовимірному просторі, де координати кожного пікселя, що характеризується значенням інтенсивності (частіше цілим числом у діапазоні від 0 до 255), визначаються перетином  $i$ -го рядка та  $j$ -го стовпця. Кількість променів, що задають координати по осі  $s$ , та кількість проєкцій  $p(s, \alpha)$ , отриманих під різними ракурсами  $\alpha$  (рис.1), у комп'ютерних томографах також обмежена, отже, проєкційні данні  $p(s, \alpha)$  є не неперервною, а *дискретною функцією* двох змінних  $(s_j, \alpha_i)$ . Звідси випливає, що відновлення зображення за *матрицею синограми* не може бути ідеальним. Найчастіше розглядається випадок, коли відліки функції  $\mathfrak{R}(s_j, \alpha_i)$  беруться з рівномірними кроками  $\Delta_s$  та  $\Delta_\alpha$ . Якщо

припустити, що промені паралельні (рис.1), то їх кількість можна визначити як  $N_s = \lceil 2r / \Delta_s \rceil$ , а кількість кутів (проекцій) як  $N_\alpha = \lceil \pi / \Delta_\alpha \rceil$ , де  $\lceil \cdot \rceil$  – ціла частина дійсного числа. А проекційні данні (матриця синограми) являють собою двовимірний масив розмірністю  $N_\alpha \times N_s$ , де  $N_\alpha$  – кількість рядків,  $N_s$  – кількість стовпців. *Томограма* реконструюється так само для дискретних значень просторових координат  $(x_i, y_j)$ . Як правило, використовується рівномірна прямокутна сітка, а матриця відновлюваного зображення  $f(x_i, y_j)$  поперечного перерізу об'єкта має розмірність  $N_x \times N_y$ , де  $N_x = N_y = \lceil 2r / \Delta \rceil$ ,  $\Delta$  – крок дискретизації, однаковий для обох просторових змінних  $x$  та  $y$ .

Таким чином, *метод КТ* складається з двох етапів:

- 1) Отримуємо данні вимірювань – проекції  $p(s_j, \alpha_i)$ , що реєструються набором фотодетекторів під різними кутами  $\alpha_i$ , де  $s_0=0, s_1=\Delta_s, s_2=2\Delta_s, s_3=3\Delta_s, \dots, s_j=j\Delta_s, \dots, s_{N_s}=(N_s-1)\Delta_s$  – координата фотодетектора, що реєструє променеву суму  $\mathfrak{R}(s_j, \alpha_i)$  (3) на виході з об'єкту,  $j$  – індекс фотодетектора (променя);  $\alpha_0=0, \alpha_1=\Delta_\alpha, \alpha_2=2\Delta_\alpha, \alpha_3=3\Delta_\alpha, \dots, \alpha_i=i\Delta_\alpha, \dots, \alpha_{N_\alpha}=(N_\alpha-1)\Delta_\alpha$  – дискретні значення кута,  $i$  – індекс кута; тобто вихідними даними для реконструкції зображення поперечного перерізу об'єкта є двовимірний масив дискретних значень проекцій  $\mathfrak{R}(s_j, \alpha_i)$ ,  $j = 0, N_s - 1, i = 0, N_\alpha - 1$ .
- 2) Обробка проекційних даних з метою відновлення матриці зображення поперечного перерізу, що досліджується,  $f(x_j, y_i)=f_{ij}$ , де  $x_0=0, x_1=\Delta, x_2=2\Delta, \dots, x_j=j\Delta, \dots, x_{N_x}=(N_x-1)\Delta$  – відліки по осі  $x$ ;  $y_0=0, y_1=\Delta, y_2=2\Delta, \dots, y_i=i\Delta, \dots, y_{N_y}=(N_y-1)\Delta$  – відліки по осі  $y$ :

$$\begin{bmatrix} \mathfrak{R}_{11} & \mathfrak{R}_{12} & \dots & \mathfrak{R}_{1j} & \dots & \mathfrak{R}_{1N_s} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathfrak{R}_{i1} & \mathfrak{R}_{i2} & \dots & \mathfrak{R}_{ij} & \dots & \mathfrak{R}_{iN_s} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathfrak{R}_{N_\alpha 1} & \mathfrak{R}_{N_\alpha 2} & \dots & \mathfrak{R}_{N_\alpha j} & \dots & \mathfrak{R}_{N_\alpha N_s} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1j} & \dots & f_{1N_x} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{i1} & f_{i2} & \dots & f_{ij} & \dots & f_{iN_x} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{N_y 1} & f_{N_y 2} & \dots & f_{N_y j} & \dots & f_{N_y N_x} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

де  $\mathfrak{R}_{ij}$  – радоновський образ (інтеграл) функції зображення  $f_{ij}$  вздовж лінії проходження  $j$ -го променя при  $i$ -му куті повороту системи зондування.

## 2. Методи реконструкції функції за її проекціями

Між радоновським образом  $\mathfrak{R}(f)$  та функцією  $f(\cdot)$ , що його породжує, існує *взаємно однозначна відповідність*, що визначається інтегральним рівнянням (3) або (4), це дозволяє *реконструювати томографічне зображення за проекційними даними*.

Метод відновлення функції зображення  $f(x, y)$  за її проекціями  $p(s, \alpha)=\mathfrak{R}(s, \alpha)$ , що являють собою двовимірну структуру даних (матрицю в дискретному випадку) з набору одновимірних функцій проекцій, отриманих для різних кутів  $\alpha$ , формально можна записати так

$$f(x, y) = \mathfrak{R}^{-1}(p(s, \alpha)) = \mathfrak{R}^{-1}(\mathfrak{R}(s, \alpha)), \quad (6)$$

де  $\mathcal{R}^{-1}$  – зворотне ПР;  $p(s, \alpha) = \mathcal{R}(s, \alpha)$  – набір проєкцій поперечного перерізу об'єкта, що просвічується під різними можливими кутами напряму променів  $\alpha$  (сिनोगрамма<sup>1</sup>);  $s$  – координата елементарного детектора / джерела.

### 2.1. Теорема про центральний переріз

Більшість алгоритмів відновлення томографічних зображень ґрунтується на теоремі про центральний переріз, що встановлює зв'язок між двовимірним перетворенням Фур'є функції  $f(x, y)$  та одновимірним перетворенням Фур'є її проєкцій  $p(s, \alpha)$  (див. рис. 3).

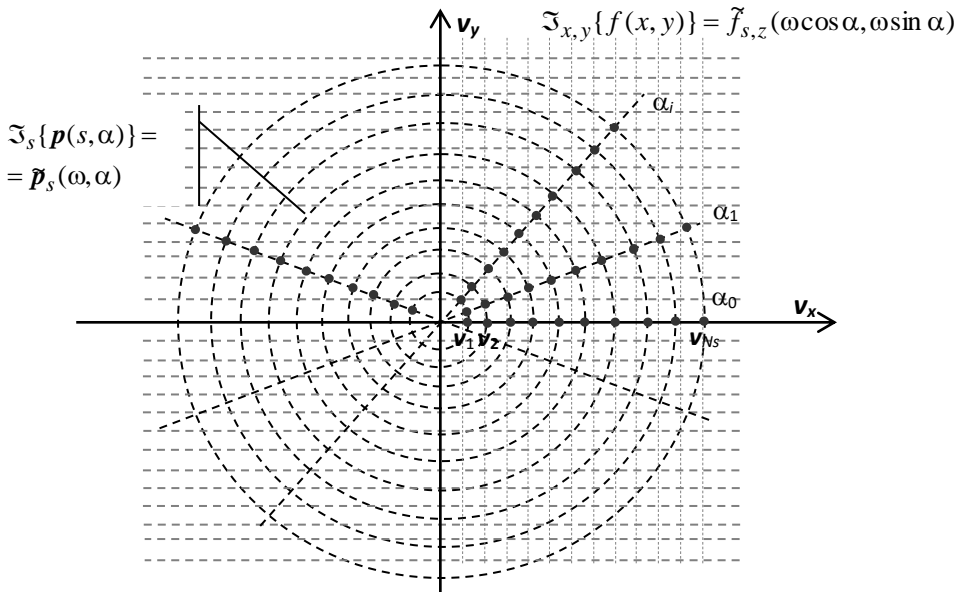


Рисунок 3 – Прямокутна та полярна сітки відліків у частотній області

Розглянемо двовимірне *пряме перетворення Фур'є* (ПФ) функції  $f(x, y)$  в декартовій системі координат:

$$\tilde{f}_{x,y}(v_x, v_y) = \mathcal{F}_{x,y}\{f(x, y)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-i(v_x x + v_y y)} dx dy, \quad (7)$$

де  $\tilde{f}_{x,y}(v_x, v_y)$  – *фур'є-образ* від функції  $f(x, y)$ , при цьому нижні індекси означають змінні, за якими здійснюється інтегрування;  $\mathcal{F}(\cdot)$  – символ ПФ;  $(v_x, v_y)$  – прямокутна система координат у частотній області ПФ (лінійні частоти);  $i$  – мніма одиниця.

Перейдемо до *полярної системи координат*, тобто введемо такі змінні:



$$\begin{cases} v_x = \omega \cos \alpha, \\ v_y = \omega \sin \alpha; \end{cases} \begin{cases} \omega = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}, \\ \alpha = \operatorname{arctg}(v_x / v_y); \end{cases}, \quad (8)$$

де  $\omega=2\pi\nu$  – кругова частота.

Як бачимо з рис.1:  $z = -x \cos(90^\circ - \alpha) + y \sin(90^\circ - \alpha) = -x \sin \alpha + y \cos \alpha$ ,  $s = x \cos \alpha + y \sin \alpha$ ; де  $x' = s$ ,  $y' = z$  у повернутій системі координат, а формули повороту осей (2) запишемо так:

$$\begin{cases} x = x' \cos \alpha - y' \sin \alpha; \\ y = x' \sin \alpha + y' \cos \alpha \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} x = s \cos \alpha - z \sin \alpha; \\ y = s \sin \alpha + z \cos \alpha \end{cases}. \quad (9)$$

Отже, зробивши у формулі (7) заміну змінних  $v_x, v_y$  (8) та  $x, y$  (9) ( $v_x x + v_y y = \omega s$ ) та застосувавши *якобiан переходу* від координат  $(x, y)$  у координати  $(z, s)$   $dxdy = \det \begin{bmatrix} \partial x / \partial s & \partial x / \partial z \\ \partial y / \partial s & \partial y / \partial z \end{bmatrix} = \det \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} dzds = dzds$ , запишемо формулу (7) у вигляді:

$$\begin{aligned} \tilde{f}_{z,s}(\omega \cos \alpha, \omega \sin \alpha) &= \mathfrak{I}_{z,s}\{f(s, z)\} = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(s \cos \alpha - z \sin \alpha, s \sin \alpha + z \cos \alpha) e^{-i\omega s} dz ds = \\ &= \tilde{p}_s(\omega, \alpha) = \mathfrak{I}_s\{p(s, \alpha)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \mathfrak{R}(s, \alpha) e^{-i\omega s} ds, \end{aligned} \quad (10)$$

де  $\tilde{p}_s(\omega, \alpha)$ - *фур'є-образ* проєкції  $p(s, \alpha)^1$ ;  $\mathfrak{I}_s\{p(s, \alpha)\}$  – *одновимірне ПФ* проєкції  $p(s, \alpha)$ ;  $\mathfrak{R}(s, \alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} f(s \cos \alpha - z \sin \alpha, s \sin \alpha + z \cos \alpha) dz$  – *ПР* функції  $f(x, y)$  (3).

Таким чином, *одновимірне ПФ*  $\mathfrak{I}_s\{p(s, \alpha)\}$  від *ПР*  $\mathfrak{R}(s, \alpha)$  – *проєкції*  $p(s, \alpha)$  є *двовимірним ПФ*  $\mathfrak{I}_{x,y}\{f(x, y)\}$  *функції*  $f(x, y)$ . Звідси випливає, що *зворотне двовимірне ПФ*  $\mathfrak{I}_{v_x, v_y}^{-1}\{f(v_x, v_y)\}$  є *зворотним ПР*  $\mathfrak{R}^{-1}(p_\alpha(s)) = \mathfrak{R}^{-1}(\mathfrak{R}(s, \alpha))$  (6).

Розглянемо *двовимірне зворотне ПФ* функції  $f(x, y)$ :

<sup>1</sup> На різницю від  $(s, \alpha)$  пара дійсних чисел  $(\omega, \alpha)$  з області визначення фур'є-образа ПР  $\tilde{p}(\omega, \alpha)$  може бути інтерпретована як точка на площині в полярних координатах, оскільки  $\tilde{p}(0, \alpha_1) = \tilde{p}(0, \alpha_2)$ , якщо  $\alpha_1 \neq \alpha_2$ . Крім того, виконується умова  $\tilde{p}(\omega, \alpha) = \tilde{p}(-\omega, \alpha + \pi)$ .

$$f(x, y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{f}_{x,y}(v_x, v_y) e^{i(v_x x + v_y y)} dv_x dv_y, \quad (11)$$

де  $\tilde{f}_{x,y}(v_x, v_y) = \tilde{f}_{z,s}(\omega \cos \alpha, \omega \sin \alpha)$  – фур'є-образ функції  $f(x, y)$  (7).

Перепишемо цю формулу в полярній системі координат (див. рис.3), використовуючи якобіан переходу з системи координат ПФ  $(v_x, v_y)$  до полярних координат  $(\omega, \alpha)$

$$dv_x dv_y = \det \begin{bmatrix} \partial v_x / \partial \omega & \partial v_x / \partial \alpha \\ \partial v_y / \partial \omega & \partial v_y / \partial \alpha \end{bmatrix} d\omega d\alpha = \det \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\omega \sin \alpha \\ \sin \alpha & \omega \cos \alpha \end{bmatrix} d\omega d\alpha = \omega d\omega d\alpha.$$

Тоді формула (11) набуває вигляду

$$f(x, y) = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \tilde{f}(\omega \cos \alpha, \omega \sin \alpha) e^{i\omega(x \cos \alpha + y \sin \alpha)} \omega d\alpha d\omega, \quad (12)$$

Враховуючи формулу (10), отримуємо формулу звернення для ПР  $\mathfrak{R}^{-1}(\omega, \alpha)$ :

$$f(x, y) = \mathfrak{T}_{\omega, \alpha}^{-1} \{ \tilde{f}_{z,s}(\omega \cos \alpha, \omega \sin \alpha) \} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \mathfrak{R}_s(\omega, \alpha) e^{i\omega(x \cos \alpha + y \sin \alpha)} \omega d\omega d\alpha, \quad (13)$$

де  $\mathfrak{R}_s(\omega, \alpha) = \mathfrak{T}_s \{ p(s, \alpha) \} = \int_{-\infty}^{\infty} \mathfrak{R}(s, \alpha) e^{-i\omega s} ds$  – одновимірне ПФ над ПР

функції  $f(x, y)$  (3);  $\mathfrak{T}^{-1}(\cdot)$  – символ зворотного ПФ.

Вираз (13) визначає метод відновлення томограми за проєкціями, що називається Фур'є алгоритмом (або методом Фур'є-синтезу).

*Теорема про центральний переріз стверджує, що одновимірний фур'є-образ проєкції  $p(s, \alpha)$  дорівнює перерізу двовимірного фур'є-образа функції  $f(x, y)$  вздовж прямої, що проходить через початок координат у частотній області під кутом  $\alpha$  до осі  $v_x$  (рис.3), тобто*

$$\tilde{p}_s(\omega, \alpha) = \mathfrak{T}_s \{ \mathfrak{R}(s, \alpha) \} = \int_{-\infty}^{\infty} \mathfrak{R}(s, \alpha) e^{-i\omega s} ds = \tilde{f}_{z,s}(\omega \cos \alpha, \omega \sin \alpha) = \tilde{f}_{x,y}(v_x, v_y), \quad (14)$$

де координати в прямокутній  $(v_x, v_y)$  і в полярній  $(\omega, \alpha)$  системах координат області частот (рис.3) зв'язані співвідношеннями (8).

## 2.2. Фур'є-алгоритм відновлення томограми

За двовимірним фур'є-образом  $\tilde{f}(\omega \cos \alpha, \omega \sin \alpha)$  можна відновити функцію  $f(x, y)$ , застосовуючи зворотне двовимірне ПФ у полярних координатах (13).

Фур'є-алгоритм реконструкції томографічного зображення  $f(x, y)$  такий:

- 1) Знаходяться одновимірні фур'є-образи  $\tilde{p}_s(\omega, \alpha)$  за проєкціями  $p(s, \alpha)$ :

$$\tilde{p}(\omega, \alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} p(s, \alpha) e^{-i\omega s} ds.$$

Отримуємо двовимірний спектр в полярній системі координат  $(\omega, \alpha)$ .

- 2) Виконується зворотне двовимірне ПФ у полярній системі координат:

$$f(x, y) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \omega \tilde{p}(\omega, \alpha) e^{i\omega(x \cos \alpha + y \sin \alpha)} d\omega d\alpha. \quad (15)$$

У випадку застосування Фур'є-алгоритма до реальних дискретних даних, що є двовимірним масивом проєкцій  $p(s_j, \alpha_i)$ , де  $j = \overline{0, N_s - 1}$ ,  $i = \overline{0, N_\alpha - 1}$ , виникають труднощі, обумовлені тим, що процедури дискретного ПФ здійснюються на *прямокутній сітці відліків*, а фур'є-образи проєкцій знаходяться на *полярній сітці* (див. рис.3). Тому в частотній області застосовується *інтерполяція* відомих значень у вузлах полярної сітки в значення у вузлах прямокутної сітки.

*Фур'є-алгоритм* відновлення томограми за *дискретними* даними складається з трьох основних операцій:

- 1) Обчислення за допомогою одновимірного дискретного ПФ (ДПФ) або швидкого ПФ (ШПФ) фур'є-образів проєкцій  $\tilde{p}_s(\omega_j, \alpha_i)$  для дискретних значень кута  $\alpha_i$ ,  $i = \overline{0, N_\alpha - 1}$ .
- 2) Інтерполяція значень  $\tilde{p}_s(v_{xk}, v_{yl})$ , де  $k = \overline{0, N_x - 1}$ ,  $l = \overline{0, N_y - 1}$ , на прямокутній сітці за значеннями  $\tilde{p}_s(\omega_j, \alpha_i)$  на полярній сітці.
- 3) Двовимірне зворотне ДПФ або ШПФ на прямокутній сітці, що дає оцінку функції зображення  $f(x_k, y_l)$  так само на прямокутній сітці.

Переваги Фур'є-алгоритма:

- економічність за рахунок використання двовимірного ШПФ у випадку при розмірності рядків і стовпців, кратних  $2^k$ , однак для зменшення помилок інтерполяції масиви даних необхідно доповнювати нулями;
- у результаті застосування інтерполяції усуваються характерні для алгоритмів відновлення томограм артефакти (помилкові об'єкти і лінії), особливо помітні на краях зображення.

Недоліки:

- відліки в полярній системі координат фур'є-образів проєкцій не еквідистантні – щільність точок неоднакова (див. рис.3);
- для переходу до прямокутної сітки  $(v_x, v_y)$  в частотній області необхідна інтерполяція, що, крім позитивного ефекту, має й негативний: вносить викривлення під час зворотного перетворення функції в систему координат  $(x, y)$ ;
- якість інтерполяції на низьких частотах краще у зв'язку з більшою щільністю відліків (див. рис.3), що призводить до зниження чіткості відновлюваного зображення (по суті, множення Фур'є-образів проєкцій на  $\omega$  замінюється інтерполяцією);
- високочастотні осциляції на зображенні, що відновлюється, обумовлені різкими стрибками яскравості на краях проєкційних даних, спричинених

суттєвою різницею щільності повітря та речовини, що сканується рентгенівськими променями.

### 2.3. Алгоритм зворотного проектування

Для виведення алгоритму зворотного проектування заради зручності перепишемо формулу зворотного ПФ в полярній системі координат (12):

$$f(x, y) = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \tilde{f}(\omega \cos \alpha, \omega \sin \alpha) e^{i\omega(x \cos \alpha + y \sin \alpha)} \omega d\alpha d\omega,$$

де  $\tilde{f}(\omega \cos \alpha, \omega \sin \alpha)$  – фур'є-образ функції  $f(x, y)$  в полярній системі координат (8).

Застосовуючи теорему про центральний переріз (14), замінивши  $\tilde{f}(\omega \cos \alpha, \omega \sin \alpha)$  на фур'є-образ проекції  $\tilde{p}(\omega \cos \alpha, \omega \sin \alpha)$ , маємо:

$$f(x, y) = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \omega \tilde{p}(\omega \cos \alpha, \omega \sin \alpha) e^{i\omega(x \cos \alpha + y \sin \alpha)} d\alpha d\omega,$$

Використовуючи властивість симетрії фур'є-образа ПР<sup>3</sup>  $\tilde{p}(\omega, \alpha) = \tilde{p}(-\omega, \alpha + \pi)$ , змінюємо границі інтегрування  $\begin{cases} 0 \leq \alpha < 2\pi; \\ 0 \leq \omega < \infty, \end{cases}$  на більш зручні  $\begin{cases} 0 \leq \alpha < \pi; \\ -\infty < \omega < \infty. \end{cases}$  Тоді:

$$f(x, y) = \int_0^{\infty} \int_0^{\pi} |\omega| \tilde{p}(\omega \cos \alpha, \omega \sin \alpha) e^{i\omega(x \cos \alpha + y \sin \alpha)} d\omega d\alpha. \quad (16)$$

Таким чином, щоб за проекціями  $p(s, \alpha)$  відновити функцію  $f(x, y)$ , необхідно у відповідності з (16) виконати таку послідовність операцій:

- 1) Знаходження одновимірних фур'є-образів проекцій  $\tilde{p}_s(\omega, \alpha)$ :

$$\tilde{p}_s(\omega, \alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} p(s, \alpha) e^{-i\omega s} ds,$$

або з урахуванням обмеженості розмірів об'єкту, що досліджується (рис.1):

$$\tilde{p}_s(\omega, \alpha) = \int_{-r}^r p(s, \alpha) e^{-i\omega s} ds.$$

- 2) Помноження  $\tilde{p}_s(\omega, \alpha)$  на  $|\omega|$ .

- 3) Знаходження за допомогою одновимірного зворотного ПФ модифікованих проєкцій

$$\hat{p}(x \cos \alpha + y \sin \alpha, \alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} |\omega| \hat{p}(\omega, \alpha) e^{i\omega(x \cos \alpha + y \sin \alpha)} d\omega . \quad (17)$$

- 4) Інтегрування по куту  $\alpha$ :

$$f(x, y) = \int_0^{\pi} \hat{p}(x \cos \alpha + y \sin \alpha, \alpha) d\alpha . \quad (18)$$

Операція (18) є операцією зворотного проєктування.

Для дискретних даних модифіковані проєкції  $\hat{p}(\cdot)$  (17) обчислюються за допомогою ДПФ, а операція інтегрування (18) замінюється підсумовуванням по куту  $\alpha_i$ .

Перші три операції за наведеним алгоритмом для отримання модифікованих проєкцій  $\hat{p}(\cdot)$  можна замінити операцією згортки проєкції  $p(s, \alpha)$  (для фіксованого кута  $\alpha$ ) з функцією  $h(s)$ :

$$\hat{p}(x \cos \alpha + y \sin \alpha, \alpha) = \hat{p}(s, \alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} h(s_1) p(s - s_1) ds_1 = h(s) * p(s, \alpha) , \quad (19)$$

де  $h(s) = \mathfrak{F}^{-1}\{|\omega|\}$  – імпульсна характеристика фільтра з частотною характеристикою  $H(\omega) = |\omega|$ ; \* – операція згортки;  $\mathfrak{F}^{-1}(\cdot)$  – символ зворотного ПФ.

Зрозуміло, що такий фільтр посилює верхні частоти.

З виразів (18) та (19) випливає, що зворотне ПР  $f(x, y) = \Re^{-1}(p(s, \alpha))$  за допомогою алгоритму згортки здійснюється в два етапи:

- 1) Згортка проєкцій  $p(s, \alpha)$  з імпульсною характеристикою  $h(s)$  (19). Результатом згортки є модифіковані проєкції  $\hat{p}(s, \alpha)$ .
- 2) Зворотне проєктування модифікованих проєкцій за формулою (18).

Переваги алгоритмів зворотного проєктування:

- операції згортки і зворотного проєктування для кожного ракурсу  $\alpha$  можуть виконуватися незалежно, а вихідне зображення знаходиться як сума зображень, отриманих для кожного кута. Отже, витрати машинного часу під час паралельної обробки даних виявляються виключно малими;
- висока якість томограми локальної ділянки досліджуваного перерізу (просвічується лише цікава для діагностики ділянка, при цьому кількість променів і, звідси, доза опромінення помітно зменшуються). Вказана перевага обумовлена тим, що імпульсна характеристика фільтра містить лише кілька значущих відліків, і відсутність проєкційних даних за межами порівняно вузького пучка призводить лише до спотворень відліків на краях локальної ділянки.

Недоліки:

- підвищена чіткість модифікованих проєкцій, обумовлена застосуванням фільтра високих частот  $H(\omega) = |\omega|$ ;
- потрібна додаткова фільтрація для послаблення посиленого множенням на  $|\omega|$  високочастотного шуму, що вносить спотворення (необхідно для відновлення зображення за даними абсорбції, для фазового контрасту якість задовільна [9]);
- під час знаходження оцінки томограми на дискретній прямокутній сітці за допомогою операції зворотного проєктування (18) так само застосовується інтерполяція, однак не в частотних, як для Фур'є-алгоритму, а в просторових координатах.

Алгоритм зворотного проєктування для реконструкції томографічних зображень найбільш поширений у рентгенівській КТ. Приклад застосування алгоритму наведено на рисунку 4.

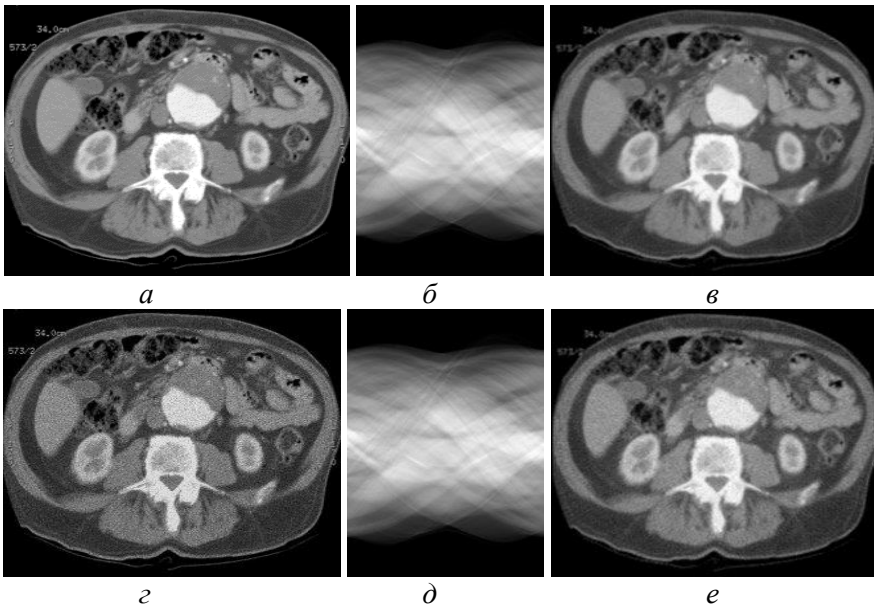


Рисунок 4 – Реконструкція томограми зрізу мозку: а) тестове зображення; б) синограма; в) відновлене зображення; г) зображення з шумом Пуассона; д) синограмма зображення з шумом; е) реконструкція зображення з шумом

#### 2.4. Ітераційні алгоритми

Розглянемо зворотне ПФ у полярній системі координат (16):

$$\begin{aligned}
 f(x, y) &= \mathfrak{T}_{\omega, \alpha}^{-1} \{ \tilde{f}(\omega \cos \alpha, \omega \sin \alpha) \} = \\
 &= \int_0^{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |\omega| \tilde{f}(\omega \cos \alpha, \omega \sin \alpha) e^{i\omega(x \cos \alpha + y \sin \alpha)} d\omega d\alpha . \quad (20)
 \end{aligned}$$

Проекції  $p(s, \alpha)$  двовимірної функції  $f(x, y)$  для кожного кута  $\alpha$  є одновимірними функціями від змінної  $s$ . Проекцію можна перетворити в двовимірну функцію, розтягнувши (виконавши зворотне проєктування) по

всій площині  $(x, y)$ . Внаслідок отримуємо зворотну проекцію  $p_\alpha(x, y) = p(x \cos \alpha, y \sin \alpha, \alpha)$ .

Сумарне зображення характеризується інтегруванням (підсумовуванням) зворотних проекцій для всіх значень кута  $0 \leq \alpha < \pi$ :

$$f_\Sigma(x, y) = \int_0^\pi p(x \cos \alpha, y \sin \alpha) d\alpha. \quad (21)$$

З урахуванням зворотного ПФ для проекції:  $p(s, \alpha) = \mathfrak{F}_\omega^{-1}\{\tilde{p}(\omega, \alpha)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{p}_s(\omega, \alpha) e^{i\omega s} d\omega$  і теореми про центральний переріз (14):  $\tilde{p}_s(\omega, \alpha) = \tilde{f}(\omega \cos \alpha, \omega \sin \alpha) = \tilde{f}(v_x, v_y)$  вираз (21) набуде вигляду:

$$f_\Sigma(x, y) = \int_0^\pi \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{f}(\omega \cos \alpha, \omega \sin \alpha) e^{i\omega s} d\omega d\alpha. \quad (22)$$

Порівнюючи (20) та (22), отримуємо такий зв'язок функції томограми  $f(x, y)$  та сумарного зображення  $f_\Sigma(x, y)$ :

$$f_\Sigma(\omega \cos \alpha, \omega \sin \alpha) = \tilde{f}(\omega \cos \alpha, \omega \sin \alpha) / |\omega|. \quad (23)$$

З урахування формул полярної системи координат (8) у декартовій системі координат  $(v_x, v_y)$  формула (23) переписеться так:

$$f_\Sigma(v_x, v_y) = \tilde{f}(v_x, v_y) H_\Sigma(v_x, v_y), \quad (24)$$

де  $\tilde{f}(v_x, v_y)$  – фур'є-образ функції зображення  $f(x, y)$ ;

$H_\Sigma(v_x, v_y) = 1/\sqrt{v_x^2 + v_y^2}$  – частотна характеристика фільтра низьких частот.

Коефіцієнт передачі *інверсного фільтра* для відновлення томограми  $f(x, y)$  за сумарним зображенням  $f_\Sigma(x, y)$  матиме вигляд:

$$H_{mm}(v_x, v_y) = 1/H_\Sigma(v_x, v_y) = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}, \quad (25)$$

де  $v_x, v_y$  – лінійні частоти.

Таким чином, можливий алгоритм зворотного проектування для відновлення томограми, що складається з наступних дій:

- 1) За проекціями  $p_\alpha(x, y)$  знаходиться сумарне зображення  $f_\Sigma(x, y)$  у відповідності з формулою (21);
- 2) Здійснюється інверсна фільтрація в частотних або просторових координатах:

$$f(x, y) = f_{\Sigma}(x, y) * h_{mm}(x, y), \quad (26)$$

де  $h_{mm}(x, y) = \mathfrak{F}_{v_x, v_y}^{-1} \{H_{mm}(v_x, v_y)\}$  – імпульсна характеристика інверсного фільтра.

Оскільки фільтр  $H_{\Sigma}(v_x, v_y) = 1 / \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$  (25) послаблює верхні частоти, сумарне зображення  $f_{\Sigma}(x, y)$  (24) буде розфокусованим (нечітким). Тому для кращого відновлення томограми, застосовуються *ітераційні алгоритми* [7, 10], *що використовують сумарне зображення в якості оцінки томограми.*

Переваги ітераційних алгоритмів:

- не треба зворотний оператор;
- відносна простота синтезу нелінійних ітераційних алгоритмів, що враховують апріорну інформацію про зображення; у якості оцінки зазвичай використовується зображення, отримане на попередньому кроці;
- можлива робота в інтерактивному режимі для досягнення компромісу між якістю відновлення і часом обробки.

Недоліки:

- поява смуг у результаті розтягування проєкцій, якщо кількість кутів для підсумовування проєкцій недостатня;
- евристичність (для більш точного відновлення томограми необхідне зворотне ПР);
- недоліки інверсного фільтра (крайові ефекти, посилення шуму, низька завадостійкість);
- незадовільна контрастність і чіткість сумарного зображення, звідси, для поліпшення якості оцінки томограми, необхідне застосування ітераційного алгоритму;
- затрати часу для ітерацій.

## Висновок

Наукові праці видатного математика Йоганна Радона набагато випередили свій час і значно сприяли науково-технічному прогресу. Після створення рентгенівських установок завдяки роботам Радона стало можливим те, що колись би вважалося дивом, – зазирнути всередину непрозорого об'єкту та отримати детальну картину його внутрішньої структури без втручання в її цілісність.

Практичну значимість рентгенівської КТ у різних сферах господарювання складно переоцінити. Особливо в медицині: КТ стала надзвичайно важливим неінвазивним методом діагностики та лікування, що дозволяє без оперативного втручання детально розглядіти вміст і стан внутрішніх органів. Це призвело до істотного прориву в досягненні глобальної мети забезпечення високої достовірності діагностики, ефективності лікування та профілактики різних хвороб, отже, покращення здоров'я, тобто якості та тривалості життя людини.

У майбутньому перспективи розвитку КТ великі. Створюються томографи нового покоління, що забезпечують високу ефективність та об'єктивність досліджень. Новим і перспективним напрямом розвитку КТ є фазоконтрастна рентгенівська томографія [10, 11], застосування якої



дозволить не тільки покращити якість зображень, зокрема чіткіше виявляти неоднорідності в м'яких тканих, але й суттєво зменшити дозу опромінювання, а також здешевити КТ дослідження і зробити їх масовими та загальнодоступними.

Теоретичний матеріал, поданий у статті, викладено в доступній для сприйняття формі із сподіванням на те, що він допоможе тим, хто прагне вдосконалення та розвитку чудових можливостей, що надає комп'ютерна томографія, через впровадження нових ідей, розробок та вдалих рішень, призначених слугувати на благо людству.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Radon J. Uber die bestimmung von funktionen durch ihre integralwerte langs gewisser mannigfaltigkeiten. Berichte uber die Verhandlungen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig // Journal of Mathematical Physics, 1917, no. 69, pp. 262-277.
2. Buzug T. Computed Tomography: From Photon Statistics to Modern Cone-Beam CT. Springer-Verlag, 2008.
3. Kak A.C., Slaney M. Principles of Computerized Tomographic Imaging. Society of Industrial and Applied Mathematics, 2001.
4. Троицкий И.Н. Компьютерная томография. - Москва: Знание, 1988.
5. Хермен Г. Восстановление изображений по проекциям. - М.: Мир, 1983.
6. Пикалов В.В., Преображенский Н.Г. Реконструктивная томография в газодинамике и физике плазмы. - Новосибирск: Наука, 1987.
7. Грузман И.С., Киричук В.С., Косых В.П., Перетягин Г.И., Спектор А.А. Цифровая обработка изображений в информационных системах: Учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. - 352 с.
8. Грузман И.С. Математические задачи компьютерной томографии // Соровский образовательный журнал, 2001, т. 7, № 5, с. 117-121.
9. Krenkel M. Cone-beam x-ray phase-contrast tomography for the observation of single cells in whole organs. - Universitätsverlag Göttingen: "Göttingen series in X-ray physics", 2015, vol. 17. – 238 p.
10. Biemond J., Lagendijk R.L., Mersereau R.M. Iterative Methods for Image Deblurring // Proc. of the IEEE, May 1990, vol. 78, no. 5, pp. 856 - 883.
11. Paganin D., Nugent K. A. Noninterferometric Phase Imaging with Partially Coherent Light// Physical Review Letters, Mar 1998, vol. 80, no. 12, pp. 2586 - 2589.

## REFERENCES

1. Radon J. Uber die bestimmung von funktionen durch ihre integralwerte langs gewisser mannigfaltigkeiten. Berichte uber die Verhandlungen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig. Journal of Mathematical Physics, 1917, vol.69, p262-277.
2. T. Buzug. Computed Tomography: From Photon Statistics to Modern Cone-Beam CT. Springer-Verlag, 2008.
3. A.C. Kak, M. Slaney, Principles of Computerized Tomographic Imaging, Society of Industrial and Applied Mathematics, 2001.
4. Troitskiy Y.N. Komp'yuternaya tomografiya [Computed Tomography]. – Moscow: Znanye Publ., 1988. (In Russian)
5. Khermen H. Vosstanovlenye yzobrazhenyy po proektsiyam [Projection image restoration]. – Moscow: Myr Publ., 1983. (In Russian)

6. Pykalov V.V., Preobrazhenskiy N.H. Rekonstruktyvnaya tomografiya v hazodynamike y fizyke plazmy [Reconstructive tomography in gas dynamics and plasma physics]. - Novosybyrsk: Nauka Publ., 1987. (In Russian)
7. Hruzman Y.S., Kurychuk V.S., Kosykh V.P., Peretyahyn H.Y., Spektor A.A. Tsyfrovaaya obrabotka yzobrazheniy v ynformatsyonnykh systemakh: Uchebnoe posobyе. [Digital Image Processing in Information Systems: A Training Manual] – Novosybyrsk: NHTU Publ., 2002. – 352 p. (In Russian)
8. Hruzman Y.S. Matematycheskiye zadachy komp'yuternoy tomografyy [Mathematical problems of computed tomography] / Sorovskiy Educational Journal, 2001, vol.7, no.5, pp.117-121. (In Russian)
9. Krenkel M. Cone-beam x-ray phase-contrast tomography for the observation of single cells in whole organs. - Universitätsverlag Göttingen: “Göttingen series in X-ray physics”, 2015, vol.17. – 238 p.
10. Biemond J., Lagendijk R.L., Mersereau R.M. Iterative Methods for Image Deblurring // Proc. of the IEEE, May 1990, vol.78, no.5, pp.856 - 883.
11. Paganin D., Nugent K. A. Noninterferometric Phase Imaging with Partially Coherent Light// Physical Review Letters, Mar 1998, vol. 80, no. 12, pp. 2586 - 2589.

*Стаття надійшла до редакції 19.10.2019.*

# АНАЛІЗ, ОЦІНКА ТА ПРОГНОЗУВАННЯ В ЕКОНОМІЦІ

УДК 004.81

<https://orcid.org/0000-0002-6106-3553>

<https://orcid.org/0000-0002-7629-7563>

<https://orcid.org/0000-0003-1629-6689>

**І. О. ЛЯШЕНКО, С. С. СТЕФАНЦЕВ, В. М. ШЕМАЄВ**

## МОДЕЛЬ СИТУАЦІЇ У ФУНКЦІОНАЛЬНІЙ СИСТЕМІ КОГНІТИВНОГО ПОЛЯ

***Анотація.** У статті запропоновано модель ситуації у функціональній системі когнітивного поля. В моделі для визначення лінгвістичних значень ознаки ситуації використовуються її відносні значення. Структуризація лінгвістичних значень полягає в упорядкуванні елементів отриманої множини лінгвістичних значень і ґрунтується на методі опорних точок і методі поділу відрізка. Запропоновано метод шкалювання ознак ситуації. Наведені приклади шкалювання ознак ситуації.*

***Ключові слова:** когнітивне поле, слабоструктурована ситуація, шкалювання, когнітивна карта, експерти.*

**DOI: 10.35350/2409-8876-2019-17-4-67-74**

### Вступ

Глобалізація інформатизації суспільства та активний процес науково-технічного розвитку сприяє формуванню єдиного світового інформаційно-телекомунікаційного простору та призводить до появи розподілених систем. Існування таких систем зумовлює появу класу задач, які насамперед мають за мету досліджувати питання підвищення якості та швидкості обробки в першу чергу великої кількості даних і в другу чергу – даних в ЕОМ. У зв'язку з цим, з метою збереження та обробки даних зростає значення ЕОМ – засобу розв'язання цієї проблеми. В процесі управління виникає потреба в прийнятті рішення в слабоструктурованих динамічних ситуаціях, коли параметри (значення змінних), закони та закономірності розвитку ситуації описуються не кількісно, а якісно. Прикладом такої ситуації може бути забезпечення живучості систем управління, коли виклики як зовнішнього, так і внутрішнього характеру не мають структурованого та чіткого обрису. Унікальність даних ситуацій полягає в тому, що вони супроводжуються змінами її структури, які дуже важко передбачити. Тому, з метою прийняття рішення в умовах дефіциту точної кількісної інформації експерти та аналітики вимушені опиратися на власний досвід та інтуїцію,

застосовуючи для прийняття рішення в якості моделі динамічної ситуації суб'єктивну модель, що побудована на оцінках аналітиків. Таку суб'єктивну модель слабоструктурованої динамічної ситуації називають когнітивною картою.

## **1. Загальна постановка задачі, мета досліджень**

Модель представлення знань у вигляді когнітивного поля широко використовується в інженерії знань для подання та структуризації знань експертів при розробці баз знань експертних та інтелектуальних систем, заснованих на експертних знаннях. Когнітивне поле – це опис основних понять проблемної області та їх взаємозв'язків, у вигляді графа, діаграми, таблиці, формул або тексту, отриманий в результаті вилучення і структуризування знань суб'єкта.

Діяльність експертів та аналітиків, що направлена на дослідження ситуації та прийняття рішення за допомогою когнітивного поля, являє собою логіко-часову структуру застосування різноманітних методів та прийомів побудови когнітивної карти, її параметризації, прогнозування розвитку ситуацій, верифікації, коректування когнітивної карти та прийняття рішення. Необхідно відмітити, що при когнітивному моделюванні величезна доля спроб формалізувати слабоструктуровані процеси традиційними математичними методами закінчувалась тим, що моделі ставали настільки абстрактними, що не могли відобразити дійсність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання загальної проблеми, свідчить, що значний внесок у її вирішення зробили вчені: Kosko В. [1], Zhang W.R., Chen S.S., Bezdek J.C. [2], Максимов В.І. [3], Кулинич А.А. [4], Авдєєва З.К. [5], Кадієвський В.А. [6] та ін.

Проведений аналіз дозволяє зробити висновок про те, що методологія когнітивного моделювання розроблена досить добре. В той же час, невирішеним залишається питання уніфікації представлення числових та лінгвістичних значень ознак, що спростить вивчення поведінки ситуації, закономірності її розвитку, пояснення прогнозів і забезпечення підтримки генерації рішень для досягнення цілей в ситуації.

У зв'язку з цим мета статті полягає в дослідженні моделі ситуації у функціональній системі когнітивного поля шляхом уніфікованого представлення числових і лінгвістичних значень ознак.

## **2. Методи і результати досліджень**

Методологія структуризації слабоструктурованої ситуації, заснована на системному підході, полягає в описі ситуації в двох аспектах: структурному і функціональному. Для представлення блокової моделі ситуації у функціональній системі когнітивного поля пропонуються наступні методи:

- метод шкалювання ознак ситуації;
- методи вилучення переваг експерта для настроювання когнітивної карти ситуації;
- методи вирішення прямої та зворотної задачі.

Для побудови шкали ознаки необхідно:

1. Визначити множину лінгвістичних значень ознаки.
2. Структурувати множину лінгвістичних значень ознаки.

Для визначення лінгвістичних значень використовуються відносні значення ознаки. Наприклад, лінгвістичним значенням швидкості трафіку може служити лінгвістичне значення – «надшвидкий» або «дуже швидкий», чи «повільний» та ін. При такому визначенні лінгвістичних значень ознак ситуації задається загальний еталон значення ознаки. Завдання загального еталона значення ознаки полегшує роботу експертів при визначенні сили впливу ознак і зменшує експертні помилки.

Якщо особі, що приймає рішення (ОПР), важко прямо визначити лінгвістичні значення певної ознаки, то можна визначити множину об'єктів, що мають властивість, яка збігається з назвою оцінюваної ознаки. Причому, різні об'єкти цієї множини повинні мати різну інтенсивність прояву ознаки, а ОПР повинна добре уявляти обрані для визначення лінгвістичних значень об'єкти. Назви цих об'єктів будуть використовуватися в якості лінгвістичних значень розглянутої ознаки. Зазвичай для визначення лінгвістичних значень ознак використовуються від 7 до 9 об'єктів.

Наприклад, для оцінки інтенсивності трафіку, як оцінюваного об'єкта, може бути обрано множину різних його значень.

Структуризація лінгвістичних значень полягає в упорядкуванні елементів отриманої множини лінгвістичних значень і ґрунтується на методі опорних точок і методі поділу відрізка навпіл, запропонованому Торґерсоном В.С. [7].

Метод полягає в наступному: на множині лінгвістичних значень визначаються елементи, які відповідають максимальному та мінімальному значенню ознаки. Максимальний і мінімальний елементи вважаються опорними точками і використовуються для подальшого упорядкування всіх інших лінгвістичних значень. Упорядкування лінгвістичних значень полягає у визначенні елемента множини  $Z^*$ , лінгвістичне значення якого рівновіддалене від максимального та мінімального значень, тобто ділить інтервал значень між максимальним і мінімальним навпіл. Далі для кожного з отриманих інтервалів знаходиться середня точка, що інтерпретується, для якої й обирається елемент з невпорядкованої множини об'єктів.

Для того, щоб пояснити роботу методу впорядкування лінгвістичних значень ознак розглянемо приклад. Нехай експерт визначив множину значень ознаки інтенсивності трафіку {«Гіпершвидкий», «Відсутній», «Дуже швидкий», «Повільний», «Швидкий», «Пришвидшений», «Сильно сповільнений» «Середній», «Сповільнений»}, які мають різні швидкості передачі.

На рис. 1, рис. 2 наведений приклад упорядкування множини лінгвістичних значень для ознаки «трафік».

Мінімальний трафік в цьому списку має «відсутній», а максимальний – «гіпершвидкий» (див. рис. 1).

Середня точка – «Середній розрахунковий» – інтерпретується як середнє значення інтенсивності трафіку між мінімальним та максимальним значеннями.

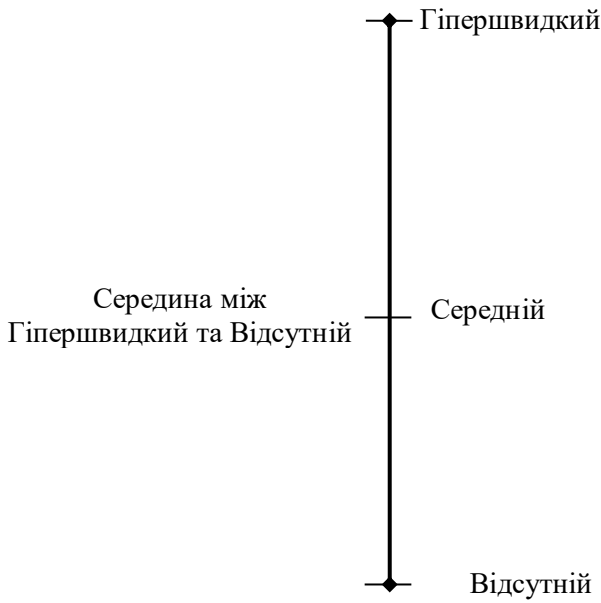


Рисунок 1 – Перша ітерація шкалювання значень ознаки трафіку

На рис. 2 показані наступні ітерації структуризації лінгвістичних значень:



Рисунок 2 – Результат шкалювання значень ознаки трафіку

Таким чином, отримано впорядковану множину лінгвістичних значень ознаки: {«Гіпершвидкий», «Дуже швидкий», «Швидкий», «Пришвидшений», «Середній», «Сповільнений», «Сильно сповільнений», «Повільний», «Відсутній»}.

Важливим є те, що при такому упорядкуванні лінгвістичних значень визначено не тільки відношення порядку лінгвістичних значень, але і відносини інтервалів між сусідніми точками.

Таким чином, для кожної ознаки  $f_{ij} \in F_i$  може бути визначено впорядковану множину лінгвістичних значень ознаки  $Z_{ij} = \{z_{ij1}, z_{ij2}, \dots, z_{ijn}\}$ .

Для вирішення практичних завдань моніторингу ситуації (спостереження значення ознаки в часі) та отримання прогнозу розвитку ситуації необхідно на множині  $Z_{ij}$  визначити поточне значення ознаки  $Z_{ijc}$  і зміни значення ознаки в часі, тобто приріст значення ознаки. Поточне значення ознаки визначається як елемент  $Z_{ijc} \in Z_{ij}$  впорядкованої множини  $Z_{ij}$ . Приріст значення ознаки визначається для поточного значення ознаки та характеризується напрямком збільшення – позитивним, негативним приростом і величиною приросту.

Для заданого поточного стану  $Z_{ijc}$  елементи множини  $Z_{ijc(c+1)}, Z_{ijc(c+2)}, \dots, Z_{ijn} \in Z_{ij}$  будуть характеризувати позитивне прирощення, а негативні збільшення характеризуються елементами  $Z_{ijc(c-1)}, Z_{ijc(c-2)}, \dots, Z_{ij1} \in Z_{ij}$ .

Для реалізації комп'ютерної системи когнітивного моделювання вихідну множину впорядкованих значень  $Z_{ij}$  необхідно представити в чисельній системі  $X_{ij}$ , тобто побудувати шкалу.

В теорії вимірів шкала визначається трійкою  $\langle Z_{ij}, X_{ij}, \varphi_{ij} \rangle$ , де  $Z_{ij}$  – вихідна не чисельна система,  $X_{ij}$  – чисельна система,  $\varphi_{ij}$  – відображення, яке встановлює гомоморфізм між вихідною та чисельними системами.

Індексами елементів впорядкованої множини  $Z_{ij} = \{z_{ij1}, z_{ij2}, \dots, z_{ijn}\} \in$  ряд натуральних чисел  $1, 2, \dots, n$ , кожне з яких суворо відповідає елементу множини лінгвістичних значень ознаки. Тобто  $z_{ij1}$  відповідає 1,  $z_{ij2}$  відповідає 2, і т.д. до  $z_{ijn}$  відповідає  $n$ . Відобразимо індекси елементів множини  $Z_{ij}$  на відрізок числової осі  $[0,1]$ .

В результаті отримаємо множину точок  $X_{ij} = \{x_{ij1}, x_{ij2}, \dots, x_{ijn}\}$ , відповідних індексам елементів множини  $Z_{ij}$ , отже, самим елементам  $X_{ij} = \{x_{ij1}, x_{ij2}, \dots, x_{ijn}\}$ . Поточному стану на інтервалі  $[0,1]$  відповідає точка  $x_{ijc}$ .

Позитивні збільшення визначаються як інтервали (відрізки) чисельної осі:  $P_{ij(c+1)}^+ = x_{ij(c+1)} - x_{ijc}$ ;  $P_{ij2}^+ = x_{ij(c+2)} - x_{ijc}$ ;  $\dots$ ;  $P_{ijn}^+ = x_{ijn} - x_{ijc}$ , а негативні

прирости визначаються як інтервали чисельної осі:

$$P_{ij(c+1)}^- = x_{ijc} - x_{ij(c-1)}; P_{ij2}^- = x_{ijc} - x_{ij(c-2)}; \dots; P_{ijc}^- = x_{ijc} - x_{i1}.$$

При обчисленні прогнозів розвитку ситуації, обчислені значення ознак не завжди потрапляють в точки чисельної осі  $x_{ij1}, x_{ij2}, \dots, x_{ijn}$ , мають лінгвістичні значення  $z_{ij1}, z_{ij2}, \dots, z_{ijn}$ , визначені в упорядкованій множині  $Z_{ij}$ .

Для визначення лінгвістичного значення будь-якої точки на відрізьку чисельної осі  $[0,1]$  використовується правило інтерпретації значення ознаки на чисельній осі на основі обчислення близькості значення до тієї чи іншої точки  $z_{ijk}$ , яка інтерпретується.

Припустимо, що в результаті обчислень було отримано значення приросту  $x_{ijh}$ , яке знаходиться між двома точками  $-x_{ij(m+2)} < x_{ijh} < x_{ij(m+1)}$ . При цьому лінгвістичне значення ознаки  $x_{ij(m+2)} \in z_{ij(m+2)}$ , лінгвістичне значення  $x_{ij(m+1)}$ , відповідно,  $z_{ij(m+1)}$ .

Для визначення лінгвістичного значення точки  $x_{ijh}$  визначимо відстань цієї точки до точки  $x_{ij(m+2)}$ , ця відстань дорівнює  $x_{ij(m+2)} - x_{ij(h)}$ , та до точки  $x_{ij(m+1)}$ , відстань, відповідно, становить  $x_{ijh} - x_{ij(m+1)}$ . Лінгвістичним значенням точки  $x_{ijh}$  вважатимемо лінгвістичне значення  $z_{ij(m+2)}$  точки  $x_{ij(m+2)}$ , якщо відстань точки  $x_{ijh}$  до цієї точки менше, ніж до точки  $x_{ij(m+1)}$ , тобто  $x_{ij(m+2)} - x_{ijh} \leq x_{ij(h)} - x_{ij(m+1)}$ . В іншому випадку лінгвістичне значення цієї точки визначиться як лінгвістичне значення  $z_{ij(m+1)}$  точки  $x_{ij(m+1)}$ .

На чисельній осі можуть бути визначені околиці  $\pm \varepsilon$  для всіх інтерпретованих точок чисельної осі  $x_{ij1}, x_{ij2}, \dots, x_{ijn}$ , в яких лінгвістичне значення збігається з лінгвістичним значенням точок  $z_{ij1}, z_{ij2}, \dots, z_{ijn}$ .

Так, точка  $x_{ijh}$  буде мати інтерпретацію  $z_{ijm}$ , якщо потрапить в околицю точки  $x_{ijm}$ , що визначається відношенням:

$$x_{ijm} - \frac{x_{ijm} - x_{ij(m-1)}}{2} < x_{ijh} \leq \frac{x_{ij(m+1)} - x_{ijm}}{2} + x_{ijm}.$$

На рис. 3 показані інтервали для інтерпретації значень чисельної системи елементами впорядкованої множини  $Z_{ij}$ .

Наприклад, значення в інтервалі  $[0.0625 - 0.1875]$  матиме лінгвістичне значення «Повільний».

Розглянемо представлення чисельних значень ознак. В теорії якісного моделювання для представлення чисельних значень ознак в якісних шкалах використовується так званий оператор узагальнення  $[ ] Q$  [8, 9]. Застосування оператора узагальнення до числа дозволяє інтерпретувати це число як символ, що відповідає цьому числу. Наприклад,  $[6] Q =$  «шість» або «6»,  $[2,234] Q =$  «дві цілих двісті тридцять чотири сотих» або «2.234» і т.д.



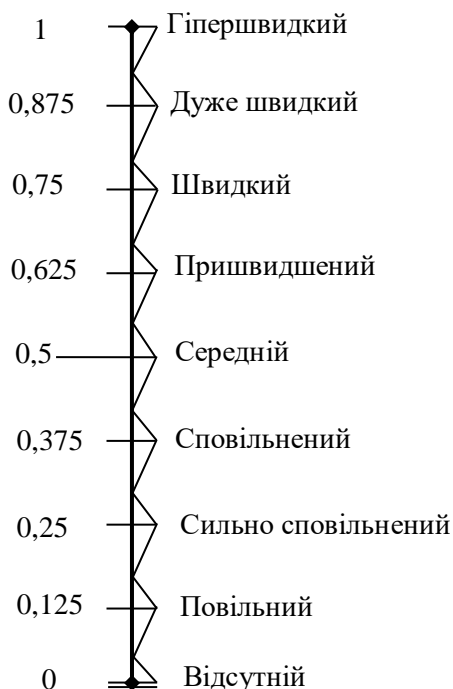


Рисунок 3 – Інтервали інтерпретації значень чисельної системи

Дослідження застосування оператора узагальнення до впорядкованої послідовності дійсних чисел призведе до впорядкованої множини символів. Тобто,  $[0, 0,125, 0,25, 0,375, 0,5, 0,625, 0,75, 0,875, 1]$   $Q = \{ \langle 0 \rangle, \langle 0,125 \rangle, \langle 0,25 \rangle, \langle 0,375 \rangle, \langle 0,5 \rangle, \langle 0,625 \rangle, \langle 0,75 \rangle, \langle 0,875 \rangle, \langle 1 \rangle \}$ , де  $0 < 0,125 < \dots < 1$  і  $\langle 0 \rangle < \langle 0,125 \rangle < \dots < \langle 1 \rangle$ .

Для ознак, значення яких визначається на інтервалі значень  $[N_1, N_2]$  спочатку отримуємо велике число рівновіддалених значень (точок), що поділяють цей інтервал на рівні частини. Потім, отримані точки за допомогою оператора узагальнення  $[ ] Q$  представляються у вигляді впорядкованої множини лінгвістичних значень ознаки  $Z_{ij} = \{z_{ij1}, z_{ij2}, \dots, z_{ijn}\}$ .

### 3. Висновки

Наведене вище уніфіковане представлення числових і лінгвістичних значень ознак спрощує вивчення поведінки ситуації, закономірності її розвитку, пояснення прогнозів і забезпечує підтримку генерації рішень для досягнення цілей в ситуації. Це, у свою чергу, забезпечує подання та структурування знань експертів при розробці баз знань експертних та інтелектуальних систем, заснованих на експертних знаннях.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kosko B. Fuzzythinking. Hyperion, Reprint edition (June 1, 1994). – 336 p.
2. Zhang W.R., Chen S.S., Bezdek J.C. Pool2: A generic system for cognitive map development and decision analysis // IEEE Transaction on systems, man, and cybernetics. 1989. – V.19. – № 1. – P. 31–39.

3. Максимов В.И. Когнитивный анализ и управление развитием ситуации // Материалы 1-й Международной конференции в 3-х томах. Том 2 / Сост. В.И. Максимов. М.: Институт проблем управления РАН. – 2001. С. 10–22.
4. Кулинич А.А. Система моделирования плохо определенных нестационарных ситуаций // Труды второй международной конференции «Когнитивный анализ и управление развитием ситуации». – М.: ИПУ РАН. 2002. – С. 44–50.
5. Авдеева З.К. Когнитивное моделирование для решения задач управления слабоструктурированными системами (ситуациями) / З. К. Авдеева, С. В. Коврига, Д. И. Макаренко // Институт проблем управления РАН. – 2010. № 16 – С. 26–39.
6. Кадієвський В. А. Когнітивне моделювання прийняття управлінських рішень на підприємстві / В. А. Кадієвський, Л. П. Перхун // Науковий вісник Національної академії статистики, обліку та аудиту: зб. наук. праць. – 2016. – № 3. – С. 48–56.
7. Torgerson W.S., Theory and Methods of scaling. New York, 1958.
8. Williams Brian C. A theory of interactions: unifying qualitative and quantitative algebraic reasoning // Artificial intelligence. – 1991. – v.51. – p. 39–94.
9. Разумовский О.В., Таран Т.А. Логико-алгебраическая модель для формализации качественных знаний // Известия Российской АН. Теория и системы управления. – 1995. – №5. – С. 100–107.

## REFERENCES

1. Kosko B. Fuzzythinking. Hyperion, Reprint edition (June 1, 1994). – 336 p.
2. Zhang W.R., Chen S.S., Bezdek J.C. Pool2: A generic system for cognitive map development and decision analysis // IEEE Transaction on systems, man, and cybernetics. 1989. – V.19. – № 1. – P. 31–39.
3. Maksymov V.I. Cognitive analysis and situation management // Materials of the 1st international conference in 3 volumes. Volumes 2 / Comp. V.I. Maksymov. M.: Institute for management issues RAS. – 2001. P. 10–22.
4. Kulynych A.A. System of design of badly certain non-stationary situations // Labours of the second international conference «Gognitive analysis and management by development of situation». – М.: Institute of management problems RAS. 2002. – P. 44–50.
5. Avdeeva Z.K. Cognitive modeling for solving problems of managing poorly structured systems (situations) / Z. K. Avdeeva, S. V. Kovryha, D. I. Makarenko // Institute for management issues RAS. – 2010. № 16 – P. 26–39.
6. Kadiievskiy V. A. Cognitive modeling of decision-making at the enterprise / V. A. Kadiievskiy, L. P. Perkhun // Scientific Bulletin of the National Academy of Statistics, Accounting and Auditing: coll. of scientific works. – 2016. – № 3. – P. 48–56.
7. Torgerson W.S., Theory and Methods of scaling. New York, 1958.
8. Williams Brian C. A theory of interactions: unifying qualitative and quantitative algebraic reasoning // Artificial intelligence. – 1991. – v.51. – p. 39–94.
9. Razumovskyi O.V., Taran T.A. Logical-algebraic model for formalizing quality knowledge // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems. – 1995. – №5. – P. 100–107.

*Стаття надійшла до редакції 14.10.2019.*

**D.V. STEFANYSHYN**

**AN APPROACH TO PREDICTING BASED ON  
MONITORING DATA BY MEANS OF COMBINED  
SITUATIONAL-INDUCTIVE MODELING  
(THE MAIN IDEA AND EXPECTED RESULTS)**

***Abstract.** This approach is proposed to use to predict the behavior of complicated technogenous, ecological and economic systems based on regular monitoring data forming time series by means of simplified models of regression type. The approach uses the idea of decomposition of complex modeling and prediction tasks by means of regression models based on monitoring data to overcome the excessive structural and parametric uncertainty of real dynamic systems. According to the approach proposed, the prediction based on monitoring data by means of combined situational-inductive modeling consists of establishing relevant situational models of regression type being adequate in the future within certain limited time intervals.*

***Keywords:** combined situational-inductive modeling, inductive and situational models, monitoring data, prediction, predictive background, time series.*

**DOI: 10.35350/2409-8876-2019-17-4-75-87**

## **Introduction**

The main predictive models based on monitoring data and used for predicting the behavior of technogenous, ecological and economic systems are the regression ones. There are many modern methods based on regression models that are quite capable of modeling complex system relationships [1-9].

The use of regression models enables to simplify significantly problems of modeling and predicting the behavior of complicated systems based on experimental or observational data giving the possibility of making decisions in various challenging situations avoiding the use of much more complex system models – both deterministic and stochastic.

However, regression models can be the most successful in the case of data interpretation. In prediction, various regression models, including quite complex regressions, can get lost their accuracy and attractiveness. Often, regression models easily overemphasize patterns that are not reproducible and demonstrate the instability of extrapolation in the prediction zone (See an illustrative example in Fig. 1 below). So a researcher cannot know about the fatal prediction faults until the next set of samples appears [1].

Nevertheless, admittedly, the regression models are the most convenient models to solve practical prediction problems in various fields [1, 2]. They can easily be formalized and adapted to experimental data, including monitoring data presented in the form of time series [3, 4]. Also, if necessary, regression models may be modified in the appropriate way depending on the peculiarities and complexities of prediction problems [1, 2].

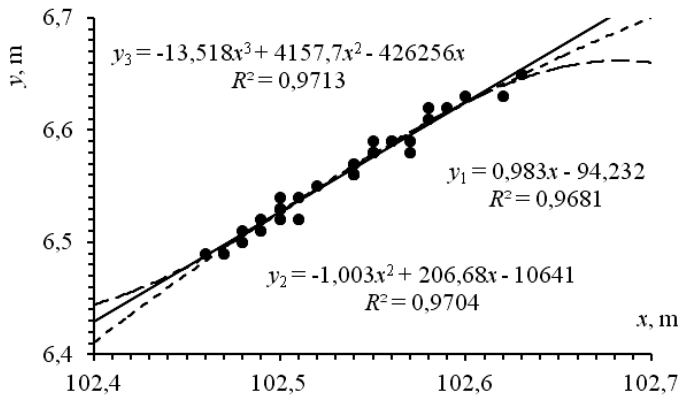


Figure 1 – An example of the instability of extrapolation by means of various regression models ( $y$  is the reaction of piezometer;  $x$  is upstream water level; the models were built according to data given in [5, 6])

This article presents some basic generalizations concerning the proposed approach to predicting based on monitoring data by means of combined situational-inductive modeling. They emerge from the results of our previous research that we performed when solving the problems of predicting based on monitoring data of the behavior of complex systems and processes having different natures and conditions to carry out monitoring [5-9].

## 1. Some common remarks concerning to situational and inductive modeling

### 1.1. Fundamentals of situational modeling

Situational modeling is usually undertaken to understanding and restoration of certain situations (the coincidence of the conditions and circumstances of the functionality) relating to the behavior of complex systems [5-10]. Nowadays, situational modeling has become especially popular in economics, medicine, military affairs, forensics, politics, and other similar spheres, as well as in artificial intelligence, where the development of a logical approach to modeling the behavior of complex systems and processes gave impetus to the creation of situational calculus theory [10-12].

The basic idea of situational modeling is that a complete description of the infinite set of all possible situations of the functioning of a real system is replaced by a certain finite set of generalized situations that reproduce to a certain degree the system's possible states [5-10]. The evolution of the dynamic system is modeled in the context of its "movement" along a series of situations that are the result of various actions. These different model situations (by R. Reiter [11]) do not determine literally appropriate states of the system; they show only the history of certain events as completed sequences of actions in certain periods of time.

Since situations cannot be described totally, and it is possible to speak only about some of their aspects, the non-monotonic output rule is used to describe the evolution of the system. In modeling, it is assumed (by J. McCarthy [12]) that on the basis of past facts, by which past situations are described, and on using some general rules or assumptions, according to which execution of actions and

occurrence of events within situations take place, it is possible to predict some similar situations that will appear in the future.

## **1.2. Inductive modeling**

Admittedly, inductive modeling is known as an original scientific approach founded by the Ukrainian scientist O.G. Ivakhnenko, boosted by his numerous doctoral students and followers. This approach found their theoretical and practical reflection in the widely famous method to be named the Group Method of Data Handling (GMDH) [13, 14].

It is now used to solve different problems the pattern recognition, the structural-parametric identification of models, the simulation and forecasting of complex processes and systems based on experimental data. According to this approach, on the basis of available observational data, a hypothesis about a possible class of models is put forward, the procedure of automatic generation of a set (it may consist of thousands and tens of thousands) of alternative models belonging to this class is formed, and the criterion of choosing the best model is established. It is assumed, since most routine work is transferred to a computer, the impact of human mistakes on the final result of modeling is minimized.

Nowadays, the GMDH method is also considered as one of the most appropriate and advanced information technologies to obtain knowledge from experimental data, or as one of the most effective methods of intellectual (or intelligent) data analysis [15]. However, the main theoretical and practical result of this approach to modeling based on experimental data is that the complexity of optimal predictive model depends on the level of uncertainty in the data: the higher this level is (e.g. due to noise or their abundance), the simpler must be the optimal model (with less number of predictors). Otherwise, the quite successful model for data interpolating can get lost its accuracy and attractiveness in predicting.

## **2. More about the challenges of prediction based on regression models**

Practice shows [1, 2, 5-9], the construction of adequate regression models for predictive purposes, especially in case of extrapolation, can be an informal and challenging problem even in simple cases, as it can be seen for the example shown in Fig 1. So, the first challenge of prediction based on regression models is that, often, better interpretation models may have a tendency to overpredict (or underpredict) low values and underpredict (or overpredict) high ones [1].

However, problems related to the construction of reliable regression models can arise in the case of the prediction within the so-called “normal” values of observed data too [5-9].

Perhaps, the main predictive problem connected with regression modeling is that regression models are traditionally built as models that should suit the best way to all collected data following the principle of optimization. As a result, the increase in the number of observation data may complicate the execution of important limit restrictions of regression modeling [5-9].

Admittedly, complicating the structures of regression models by taking into account additional factors, parameters, and nonlinear effects, etc., the quality of regression models as interpretative models for observed data can be improved. But their quality as predictive models may be deteriorated. If there is more than one

predictor, a researcher will have to further understand the characteristics of different predictors and the relationships among them. For example, between-predictor correlations (multicollinearity) may become a quite serious problem. It is well known, the simplest way to solve the multicollinearity problem is to remove the predictors that have the most correlated relationships. Usually, if predictors are highly intercorrelated, this implies that they are measuring the same underlying information. Removing some of them might lead to a more parsimonious and interpretable model without compromising the performance of the model [1, 2]. Undoubtedly, in some cases, the regression model simplification may be regarded as a practical way to improve it.

There are a lot of potential advantages of removing some predictors in regression modeling. Firstly, fewer predictors will decrease computational time and complexity. Secondly, some regression models can largely be improved in performance and (or) their stability will significantly increase without the problematic variables. But all these simplifications should be justified in terms of predicting. It should also be mentioned that the main idea of regression modeling, as it is well known, is that regression occurs when a dependent, endogenous variable depends not only on some independent, exogenous, explanatory variables (predictors) but also on some uncontrolled unknown factors. So, the choice of the structure and appropriate variables of regression models, both dependent and independent may be an informal task that requires prior research [5-9].

Essentially, the uncontrollable factors affect the structure and parameters of a regression model. So, they can be considered as certain circumstances and conditions in which a system under modeling exists in a certain period of time. In [5-9], we determined these circumstances and conditions as a peculiar predictive background. In other words, a predictive background can be considered as a set of external and (or) internal conditions including unknown predictors stipulating the structure and parameters of an accepted regression model.

The concept of predictive backgrounds is the best fit for the determination of situations in which a system is at particular points in time. In fact, the constancy of a predictive background relates to a limited period of time and can identify the only specific situation for which a relevant regression model can be built to be considered adequate (See an illustrative example in Fig. 2 below). Accordingly, various regression models corresponding to various predictive backgrounds or, in other words, to various situations describing states of a complex system in time may be adopted as situational models.

As can be seen in Fig. 2, situational models may be presented by the simplest single-factor regression models. But such significant simplification is not the only advantage of situational modeling. In general, changes of predictive backgrounds can be both regular and irregular, both stochastic (probabilistic) and principally unpredictable, uncertain or ambiguous. Some of these changes are actually impossible to forecast and estimate. Eventually, regular changes can be taken into account successfully when introducing some additional variables into regression models, whereas for irregular changes it is difficult or practically impossible to do this. Situational modeling not only enables avoiding these complexities but also to identify some peculiar situations being similar to “black swans” by Nassim Taleb [16].

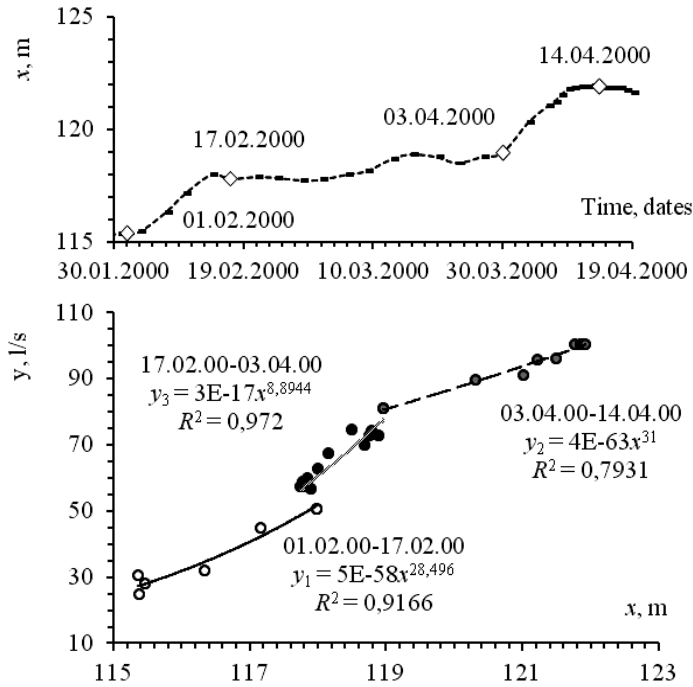


Figure 2 – Situational regression models corresponding to different predictive backgrounds ( $y$  is seepage discharges;  $x$  is upstream water levels; the models were built according to data given in [6, 8])

It is reasonable to assume that the smaller the duration of a model situation in time is, the more likely the constancy of the relevant predictive background can be expected. In Fig. 3 (See below, as illustrations), shown are four different models built for various durations and for various time intervals among which there are two “black swans” (situational models “1” and “3”).

From Fig. 3 there can be easily convinced that the regression model “0” based on all available data is the least reliable for forecasting purposes. Narrowing down the interval of retrospective modeling to the period of 1973-1998 years allowed obtaining a more reliable regression model (the model “2”) to predict. Finally, more detailed data processing revealed the possibility of peculiar “emissions” in the form of the situational regression models “1”, “3”, which took place in the past. So, it may be assumed the similar risky situations of the kind “black swans” events should be expected in the future too.

To sum up, let us emphasize the main definitions and assumptions. The definition “situational model” relates to a model adapted to a separate situation. Adequate situational models can be presented as single-factor regression models. The circumstances and conditions of a situational model adaptation to an appropriate situation are a predictive background. Situational models can reflect various phase states of a dynamic system at different time intervals.

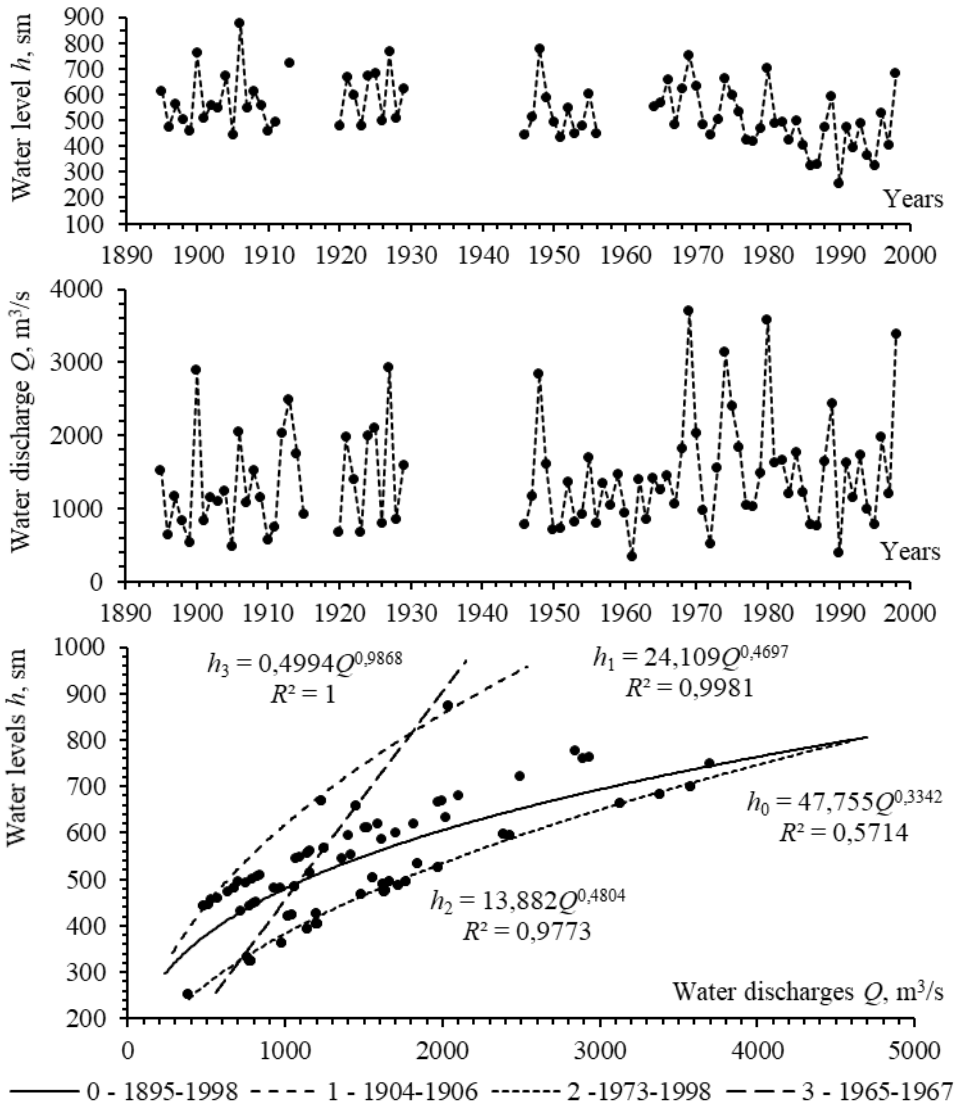


Figure 3 – Several regression models depending on data relating to different time intervals (the models were built according to data given in [9])

### 3. Presentation of the approach to combined situational-inductive modeling

The common block-scheme presenting the main stages and results of modeling and explaining the proposed approach to prediction based on monitoring data by means of combined situational-inductive modeling is shown in Fig. 4 below.

Preliminary modeling (pre-modeling) aims at selecting the type and variables of a regression model that is used further as a situational model, and decomposing the data obtained over the entire monitoring period into individual situations, resulting in a set of separate time series [5-9]. Different methods of time series data analysis can be used for this purpose [1-4, 15]. Correlation and regression analysis of monitoring data, lags analysis, etc. are performed. For example, when



constructing the situational models shown in Fig. 2, the lag equal to one day between  $y$  and  $x$  was taken into account.

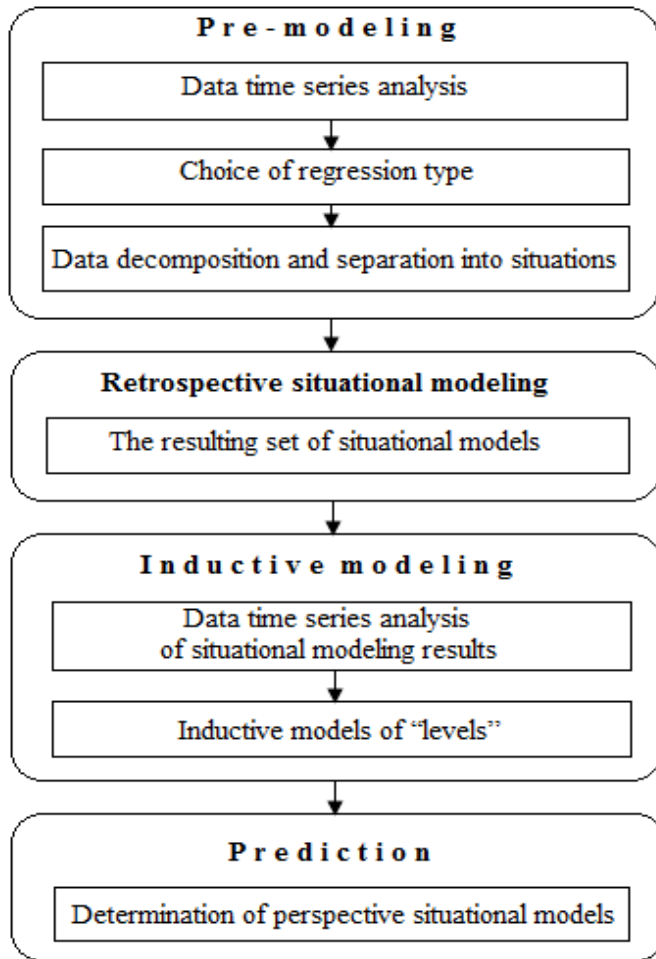


Figure 4 – The common block-scheme of the proposed approach to prediction based on monitoring data by means of combined situational-inductive modeling

To perform retrospective situational modeling, sample time series describing the behavior of dependent and independent model variables within separate time intervals are prepared. These separate samples (or clusters) have to meet certain established criteria of situational modeling adequacy that are formulated taking into account the behavior of variables of situational models relating to corresponding situations. In particular, the following common criteria of situational modeling adequacy concerning the behavior of independent variables may be considered.

- Non-stationary fluctuations of values of time series with monotonically increasing trends. Some separate time intervals characterized by relatively slow or relatively rapid monotonous trend growths of values may also be allocated.
- Non-stationary oscillations of values with monotonically increasing trends.

- Non-stationary fluctuations of values of time series with monotonically decreasing trends. Some separate time intervals characterized by relatively slow or relatively rapid monotonous trend declines of values may also be allocated.
- Non-stationary oscillations of values with monotonically decreasing trends.
- There are no trends; random stationary variations of values take place.

The result of retrospective situational modeling is a set of situational models (See, for example, a set of simple linear regressions shown in Fig. 5). It forms the basis for subsequent inductive modeling. As can be seen in the examples (Fig. 2, 3, 5), the transition from one situational model to other proceeds non-monotonically. Therefore, we assume that relevant adjacent phase states of the dynamic systems change non-monotonically too.

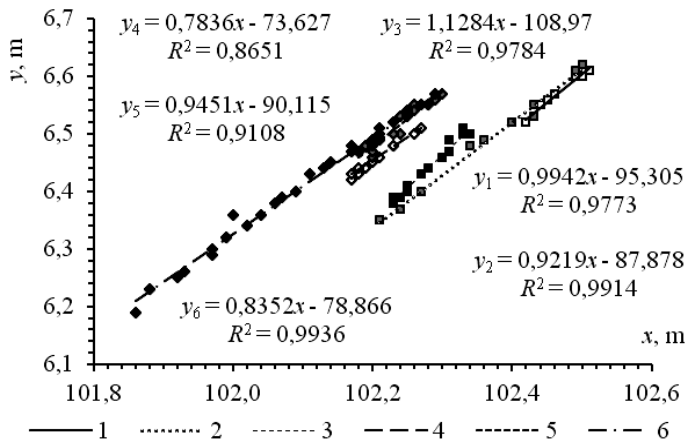


Figure 5 – Results of retrospective situational modeling  
 (y is the reaction of piezometer; x is upstream water level;  
 the situational models were built according to data given in [5, 6, 8])

In our study, the definition “inductive model” is related to a model obtained from the generalization based on a certain set situational (or, in more complex cases, inductive) models. The inductive models, in our interpretation, are models of “levels”, which determine the behavior of dependent variables for some fixed values of predictors according to situations.

Overall, inductive models may have various structures (compositions). They can be presented in the form of a set of trends (Fig. 6) if the time factor is essential or taken into account, or in the form of a set of regression models (Fig. 7), if the time factor is not taken into account or it is unessential. More general inductive models may consist of trends and random “balances” after the extraction of these trends (See an illustrative example of extraction of trends while inductive modeling in Fig. 8 below), trends and regression models for random “balances” [6, 8] and so on. Inductive models may be modified in an appropriate way if new data and tendencies appear. As well as, if necessary, time or transportation lags between model variables can be taken into account. Additionally, some techniques of adaptive modeling can be applied during the construction of both inductive and situational models [1, 2, 6-9, 15].

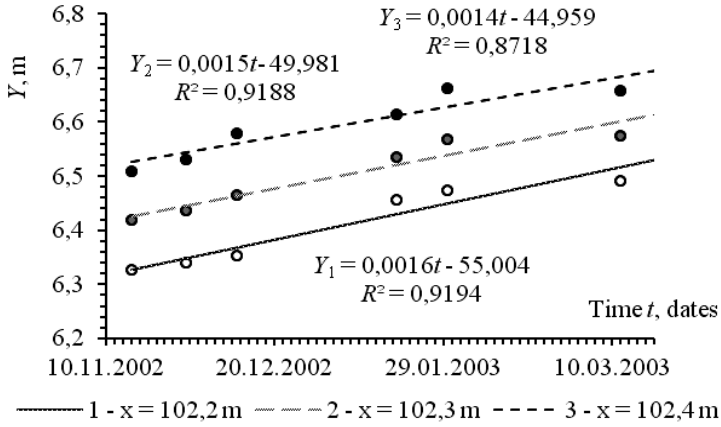


Figure 6 – Results of inductive modeling with prediction in the form of a set of trends (according to results of situational modeling, shown in Fig. 5)

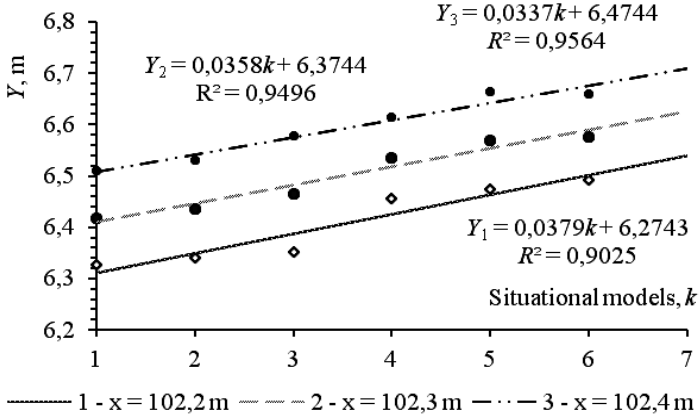


Figure 7 – Results of inductive modeling with prediction in the form of a set of regression models (according to results of situational modeling, shown in Fig. 5)

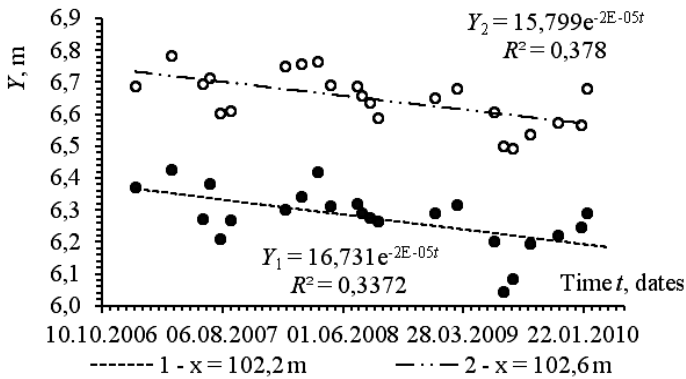


Figure 8 – An example of the extraction of trends while inductive modeling [6, 8]

Inductive models create the basis for predicting perspective situational models. In fig. 9, 10 are presented two examples of such predicting with verification obtained results on the base of observational data.

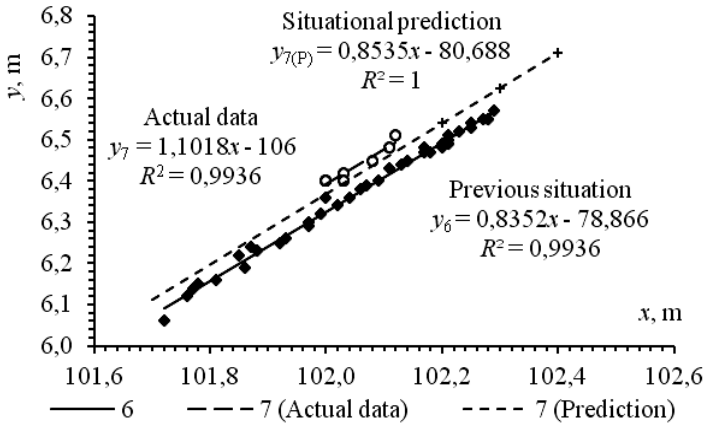


Figure 9 – Predicting of the perspective situational model 7 (data from Fig. 5, 6)

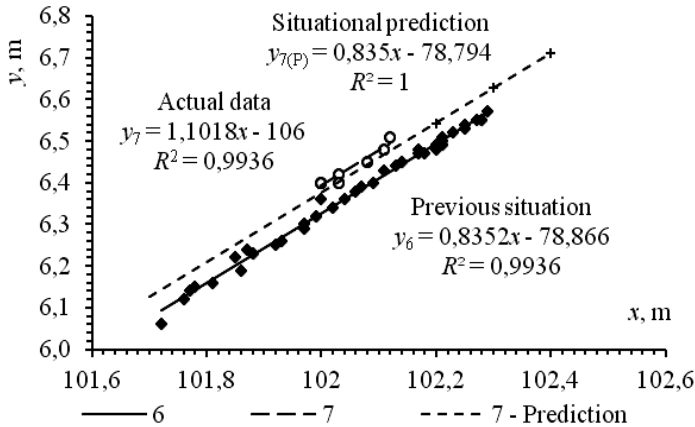


Figure 10 – Predicting of the perspective situational model 7 (data from Fig. 5, 7)

#### 4. Some pre-conclusive remarks

Actually, the task of situational predicting, in our case, is an extrapolation task defined as the identification of the most probable situational model that will meet some expected situation in the future depending on situations that appeared in the past. The results of our studies (See also [6-8]) show that depending on the characteristics of the system under study, its interaction with the environment, the completeness of the monitoring data, and other factors that may determine the behavior of the dependent and independent variables of situational and inductive models, a predicted situational model may be unambiguous or the result of situational predicting will be a certain set of perspective situational models corresponding to various expected situations in the future.

It should be also noted the next. If inductive models are built on the basis of situational models of past periods that cover data of similar clusters of actual data

(for example, taking into account the seasonal factor, etc.), the accuracy of the situational prediction on the basis of such inductive models may increase essentially [6, 8].

As well, in order to implement the proposed approach to predicting successfully, it is important to ensure to perform three basic monitoring principles formulated by R.A. Collacott [17]: 1) Consistency and regularity (continuity) of measurements for parameters and characteristics selected for the control; 2) Detection of changes in the behavior of these parameters and characteristics over time; 3) Prediction of future situations taking into account these changes.

## Conclusions

Proposed is an approach to predict the behavior of complicated systems of the different origins, based on regular monitoring data forming time series, by means of simplified models of regression type. The approach uses the idea of decomposition of complex modeling and prediction tasks by means of regression models based on monitoring data to overcome excessive structural and parametric uncertainty of dynamic systems.

According to the approach proposed, the prediction based on monitoring data by means of combined situational-inductive modeling consists of establishing relevant situational models of regression type being adequate in the future within certain limited time intervals. The approach allows using simultaneously both the principle of optimization in modeling and the principle of adaptation to situational changes occurring in dynamic systems. Practical results indicate the opportunity to carry out such situational predicting with acceptable accuracy.

## REFERENCES

1. Kuhn M., Johnson K. Applied Predictive Modeling. Springer Science+Business Media: New York, 2013. 600 p.
2. Geisser S. Predictive Inference: An Introduction. New York: Chapman & Hall, 2016. 264 p.
3. Brockwell P.J., Davis R.A. Time series: Theory and methods, second ed., Springer, 1991. 557 p.
4. Hamilton J. D. Time series analysis. Princeton University Press: Princeton, New Jersey, 1994. 782 p.
5. Stefanyshyn D.V. A method of forecasting of indexes of dynamic system that evolves slowly, based on time series analysis. ICIM 2013, Proc. of 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Inductive Modelling, Kyiv, Ukraine, September 16-20, 2013. P. 221-224.
6. Stefanyshyn D.V. Situational and inductive modelling in problems of forecasting behavior of dams equipped with modern automated monitoring systems. *Zeszyty Naukowe Inżynieria Łądowa i Wodna w Kształtowaniu Środowiska*, Nr 14, Kalisz, 2016. P. 17-27.
7. Стефанишин Д.В. Ситуаційно-індуктивне моделювання в задачах екстраполяційного прогнозування за даними моніторингу. Системні дослідження та інформаційні технології, 2016, №4. С. 35-45.
8. Stefanyshyn D.V. Improving diagnostic models for forecasting the behavior of dams equipped with automated monitoring systems. *Mathematical modeling in economy*, 2017, № 3-4. P.P. 50-61.
9. Stefanyshyn D.V., Korbutiak V.M., Stefanyshyna-Gavryliuk Y.D. Situational predictive modelling of the flood hazard in the Dniester river valley near the town of Halych. *Environmental safety and natural resources*, 2019, Is. 1 (29). P. 16-27.

10. Russell S.J., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. 3rd ed. Pearson Education, Inc.: Upper Saddle River, New Jersey, 2010. 1132 p.
11. Reiter R. Knowledge in Action: Logical Foundations for Specifying and Implementing Dynamical Systems. MIT Press, 2001. 424 p.
12. McCarthy J. Situations, actions, and causal laws. Memo 2: Stanford University Artificial Intelligence Project, 1963. 11 p. URL: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/785031.pdf>.
13. Ivakhnenko A.G. Polynomial theory of complex systems. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 4, 1971. P. 364-378.
14. Madala H.R., Ivakhnenko A.G. Inductive Learning Algorithms for Complex System Modeling. CRC Press, 1994. 368 p.
15. Berthold M., Borgelt Ch., Höppner F., Klawonn F. Guide to intelligent data analysis: how to intelligently make sense of real data. London : Springer-Verlag. 2010.
16. Taleb N.N. The Black Swan. The Impact of the Highly Improbable. Second enlarged edition. Random House. New York, 2010. 480 p.
17. Collacott R.A. Structural Integrity Monitoring. Chapman and Hall: London, New York, 1985. 455 p.

## REFERENCES

1. Kuhn, M., Johnson, K. (2013). Applied Predictive Modeling. Springer Science+Business Media: New York, 600 p.
2. Geisser, S. (2016). Predictive Inference: An Introduction. New York: Chapman & Hall, 264 p.
3. Brockwell, P.J., Davis, R.A. (1991). Time series: Theory and methods, second ed., Springer, 557 p.
4. Hamilton, J. D. (1994). Time series analysis. Princeton University Press: Princeton, New Jersey, 782 p.
5. Stefanyshyn, D.V. (2013). A method of forecasting of indexes of dynamic system that evolves slowly, based on time series analysis. ICIM 2013, Proc. of 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Inductive Modelling, Kyiv, Ukraine, September 16-20, 221-224.
6. Stefanyshyn, D.V. (2016). Situational and inductive modelling in problems of forecasting behavior of dams equipped with modern automated monitoring systems. *Zeszyty Naukowe Inżynieria Lądowa i Wodna w Kształtowaniu Środowiska*, Nr 14, Kalisz, 17-27.
7. Stefanyshyn, D.V. (2016). Situational and inductive modelling in problems of extrapolation forecasting on base of monitoring data. *System Research and Information Technologies*, №4, 35-45. (in Ukrainian).
8. Stefanyshyn, D.V. (2017). Improving diagnostic models for forecasting the behavior of dams equipped with automated monitoring systems. *Mathematical modeling in economy*, № 3-4, 50-61.
9. Stefanyshyn, D.V., Korbutiak, V.M., Stefanyshyna-Gavryliuk, Y.D. (2019). Situational predictive modelling of the flood hazard in the Dniester river valley near the town of Halych. *Environmental safety and natural resources*, Is. 1 (29), 16-27.
10. Russell, S.J., Norvig, P. (2010). Artificial Intelligence: A Modern Approach. 3rd ed. Pearson Education, Inc.: Upper Saddle River, New Jersey, 1132 p.
11. Reiter, R. (2001). Knowledge in Action: Logical Foundations for Specifying and Implementing Dynamical Systems. MIT Press, 424 p.
12. McCarthy, J. (1963). Situations, actions, and causal laws. Memo 2: Stanford University Artificial Intelligence Project, 11 p. Retrieved from <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/785031.pdf>.
13. Ivakhnenko, A.G. (1971). Polynomial theory of complex systems. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 4, 364-378.

14. Madala, H.R., Ivakhnenko, A.G. (1994). Inductive Learning Algorithms for Complex System Modeling. CRC Press, 368 p.
15. Berthold, M., Borgelt, Ch., Höppner, F., Klawonn, F. (2010). Guide to intelligent data analysis: how to intelligently make sense of real data. London, Springer-Verlag.
16. Taleb, N.N. (2010). The Black Swan. The Impact of the Highly Improbable. Second enlarged edition. Random House. New York, 480 p.
17. Collacott, R.A. (1985). Structural Integrity Monitoring. Chapman and Hall: London, New York, 455 p.

*Стаття надійшла до редакції 18.08.2019.*

**Є. С. ТАТАРЧЕНКО, В. О. ЛИФАР**

## **ОЦІНКА СТАНУ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ РИЗИКУ ІТ КОМПАНІЙ ПРИ ЗЛИТТЯХ ТА ПОГЛИНАННЯХ**

***Анотація.** Сучасний діловий клімат характеризується безперервним ростом конкуренції, зміщенням прибутку та швидкозмінними технологіями. Умови росту фінансових прибутків можуть забезпечити засоби злиття та поглинання (M&A). Одним з важливих елементів злиття та поглинання є якісна оцінка вартості та стану компанії, що є ІТ. Розробка проектів інформаційних технологій вимагає особливого проектно-керованого підходу до всіх стадій життєвого циклу проекту. Водночас такі проекти відносяться до найбільш ризикованих інвестицій. Умови росту конкурентоздатності можуть забезпечити засоби злиття та поглинання (M&A). Прийняття рішень відносно стану та управління ІТ проектами може бути пріоритетно засновано на методах і моделях оцінки ризику ІТ розробок.*

***Ключові слова:** ІТ проекти, управління проектами, моделі, прийняття рішень, mergers and acquisitions, ризик, фінансовий звіт.*

**DOI: 10.35350/2409-8876-2019-17-4-88-98**

### **Вступ**

Сучасний діловий клімат характеризується безперервним ростом конкуренції, зміщенням прибутку та швидкозмінними технологіями. Умови росту фінансових прибутків можуть забезпечити засоби злиття та поглинання (M&A). Одним з важливих елементів злиття та поглинання є якісна оцінка вартості та стану компанії, що є ІТ. Для методів злиття і поглинань неможливо використання балансових методів, які засновані на вивченні балансової вартості і вартості заміщення активів бізнесу.

Розвиток ІТ бізнесу в країні на ствердження [1] характеризується наступними показниками. Надходження від експорту ІТ послуг в 2018 році, за даними НБУ: \$3,204 млрд, приріст становив 29% в порівнянні з 2017 роком. Дохід від експорту ІТ послуг в 2018 році, за даними Держслужби статистики: \$1,578 млрд, приріст – 20% в порівнянні з попереднім роком. Кількість персоналу в експорті ІТ послуг в 2018 році, за даними DOU: 159 687 технічних фахівців на кінець року, приріст становив 26% з початку року. Всього зареєстрованих ФОП для надання ІТ послуг на початок 2018 року – 125 000.

Середня кількість персоналу: 143 385. Середня годинна ставка персоналу: \$25. Приблизний дохід: \$4,8 млрд.



Ці показники можна розцінити як перспективні. Велика кількість ІТ компаній та працівників цієї сфери свідчить про значну конкуренцію на ринку інформаційних розробок та послуг.

Позитивні можливості розвитку ІТ-галузі полягають в наступному:

1. Розвиток українських ІТ компаній в 5 разів більш динамічний, ніж загальносвітовий.

2. Значно зростає вплив українських компаній в залученні інвестицій в нові проекти, у впровадженні значних М&А угод, співпраці із великими світовими ІТ компаніями.

3. Клієнти ІТ послуг ра розробок збільшують кількість одночасних розробників ІТ послуг та орієнтуються з ІТ аутсорсингу на закінчені ІТ рішення бізнес-завдань.

4. Збільшується державна підтримка розвитку ІТ індустрії.

5. ІТ компанії активно співпрацюють з українськими закладами вищої освіти, регулюючи попит на фахівців.

Негативними подіями для ринку ІТ індустрії є:

1. Більшість ІТ компаній не встигають адаптуватися до темпів росту, особливо через слабкі можливості розвитку власних систем управління.

2. Недостатній рівень кваліфікації та злагодження команд для виконання всіх вимог клієнтів.

3. Швидке зростання кількості ІТ компаній значно погіршує операційну та фінансову спроможність, що знижає прибутки та підвищує ризик втрат.

4. ІТ аутсорсинговий ринок роздутий за рахунок неякісних безперервно конкуруючих фахівців.

5. Клієнти розширюють та змінюють роботу з різноманітними ІТ компаніями, що зменшує поточні впровадження проектів.

6. Збільшення ризику втрати клієнтів за рахунок незграбності в адаптаційних процесах та невикористання оцінки ризику сценаріїв розвитку ІТ компаній.

7. Міжнародні вимоги щодо захисту даних клієнтів ставлять перепони для впровадження ІТ послуг з України.

11. Дефіцит підготовки фахівців відповідної якості закладами вищої освіти.

Все перелічене дає можливість стверджувати, що для збільшення конкурентоздатності компаній необхідно більш ретельно оцінювати їх стан та використовувати все більш складні методи прийняття рішень, що враховують різноманітні стохастичні відхилення від детермінованих показників, що впливають на рівні прибутків та втрат.

Розробка, вдосконалення та розвиток ПЗ неможливі без використання CASE (Computer Aided Software Engineering) комплексу програм, що застосовуються для підтримки процесів створення програмних продуктів, аналізу вимог, моделювання, налагодження тестування та верифікації.

Стандарти, що використовуються в методах розробки ПЗ, описані в наступних документах:

- ISO/IEC/IEEE 12207:2017 - Software Life Cycle Processes [2];
- SEI CMM - Capability Maturity Model [3];
- ISO/IEC 15504 - Software Process Assessment [4,5];
- PMBOK - Project Management Body of Knowledge [6];
- SWEBOK - Software Engineering Body of Knowledge [7];
- ISO/IEC 12207:2008 Systems and software engineering [8].

В перелічених стандартах містяться основні вимоги щодо процесів розробки ПЗ та структурні зв'язки, котрі визначають логіку причинно-наслідкових подій, що впливають на ефективність роботи ІТ структур.

Основними дієвими методами досягнення високих показників конкурентоздатності ІТ компаній є методи злиття та поглинань (M&A).

## **1. Загальна постановка задачі, об'єкт, предмет та мета досліджень**

Розробка проектів інформаційних технологій включає процедури, засновані на особливому проектно-керованому підході до всіх стадій життєвого циклу проекту [9]. Водночас такі проекти відносяться до найбільш ризикованих інвестицій [10]. За показниками множини даних Standish Group [11], ймовірність успішного виконання і впровадження (супроводу) ІТ проекту менше ніж 0,5. Однак економічні показники підприємств, що виконують замовлення в ІТ сфері в умовах жорсткої конкуренції, не можуть існувати при таких низьких показниках ризику. Україна займала 73-тє місце з 166 країн в 2014 р., за даними International Telecommunication Union [12] при ООН, в сфері інформаційних технологій і 79-тє місце в 2017 р., що свідчить про тенденцію погіршення в цій області.

Незважаючи на це, економічна привабливість розробок в ІТ сфері пояснюється високою інвестиційною активністю і можливістю отримання прибутку без істотних фінансових вкладень в матеріальні об'єкти (нерухомість, матеріали, сировину і таке інше) [13]. Практичне зниження конкурентних можливостей ІТ компаній частково пояснюється слабким рівнем підтримки управління ризиками, що виникають при виконанні і впровадженні ІТ проектів [14].

Моделі та методи фінансових оцінок широко представлені і реалізовані програмними продуктами [15], такими як:

- пакет моделювання ділової оцінки;
- FP&A Monthly Cash Flow Forecast Modeling;
- пакет сценаріїв і аналізу чутливості;
- фінансова модель стартапа;
- моделювання злиття та поглинання (M&A);
- LBO Model – Leveraged Buyout Modeling Course;
- NPV (net present value – «чиста приведена вартість»);
- ROI (return on investment – «віддача на інвестиції»).

Однак повномасштабних методів оцінки P & L (представлених в основному у фінансових звітах компаній), загальноприйнятих для оцінки ІТ компаній, немає [16]. Крім того, не в повній мірі враховується динамічний фактор впливу стану розробки ІТ проектів на доходи і витрати.

Аналіз даних, отриманих в результаті проведення фінансового звіту P&L, найчастіше спирається на поточні показники і може бути частково використаний для пролонгації економічних показників на деякий (найчастіше обмежений) період.

При цьому практично не визначаються і кількісно не враховуються стохастичні характеристики не взаємопов'язаних впливаючих процесів [17]. Наприклад, таких як кваліфікаційний рівень команди розробників, їх рівень мотивації, нормативна база, що визначає роботу ІТ компанії і багато інших [16].

Завдання досліджень полягають в наступному:

- необхідно розробити і узгодити методи і моделі, що дозволяють в заданому довірчому інтервалі проводити оцінки фінансових, технологічних, організаційних та інших факторів щодо показників аналізованих компаній;
- створити інформаційну модель і методи обробки поточних стохастичних даних і оцінки ймовірності реалізації негативних і позитивних результатів прогнозованих станів аналізованих компаній;
- розробити методи і систему підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності, що реалізуються в інформаційній технології забезпечення управління діяльністю аналізованих ІТ компаній.

Об'єкт досліджень – процеси прийняття рішень при управлінні роботою ІТ компаній.

Предмет досліджень – моделі, методи та інформаційна технологія підтримки прийняття рішень в галузі управління станом ІТ компаній та створення конкурентоспроможного середовища їх існування.

Мета досліджень – підвищення конкурентоздатності ІТ компаній за рахунок пошуку найбільш раціональних рішень завдяки використанню інформаційної технології, моделей та методів оцінки ризику поточного стану компаній.

## **2. Методика і результати досліджень**

Вибір моделі для розробки функціонального представлення архітектури підприємства та виділення процесів розробок проектів – фактор організаційного вдосконалення та розвитку в сучасних умовах нестабільності, що дозволяє значно підвищити конкурентоздатність підприємства [18, 19].

Існуючі класифікації ІТ-проектів, що базуються на розвитку бізнес-процесів компанії, можуть бути представлені з використанням відомої моделі APQC Process Classification Framework [18], яка дозволяє поділити бізнес-процеси ІТ компанії на декілька категорій (рис. 1).

Розуміння того, які процеси компанії будуть враховуватись ІТ-проектом, а також проведення внутрішнього аудиту зрілості автоматизованих бізнес-процесів, дає можливість оцінки ймовірності успіху проекту.

Всі стадії життєвого циклу, перелічені на рис. 1, повинні бути повністю охоплені експертами при проведенні аналізу логічних зв'язків подій в сценаріях розвитку розробки проектів. Причинно-наслідкова послідовність операційних процесів визначає направлення розвитку розробок і не може бути порушена.

Модель ENAPS – це модель, що отримана завдяки виконанню спеціалізованого проекту по порівняльному бенчмаркінгу, який реалізував програму ENAPS (Європейська сітка вивчення перспективних показників) (рис. 2).

Згідно з даною моделлю всі бізнес-процеси діляться на первинні – чотири групи (що створюють цінність) і вторинні (супровід, допоміжні), з яких потім відокремлюються процеси розвитку.

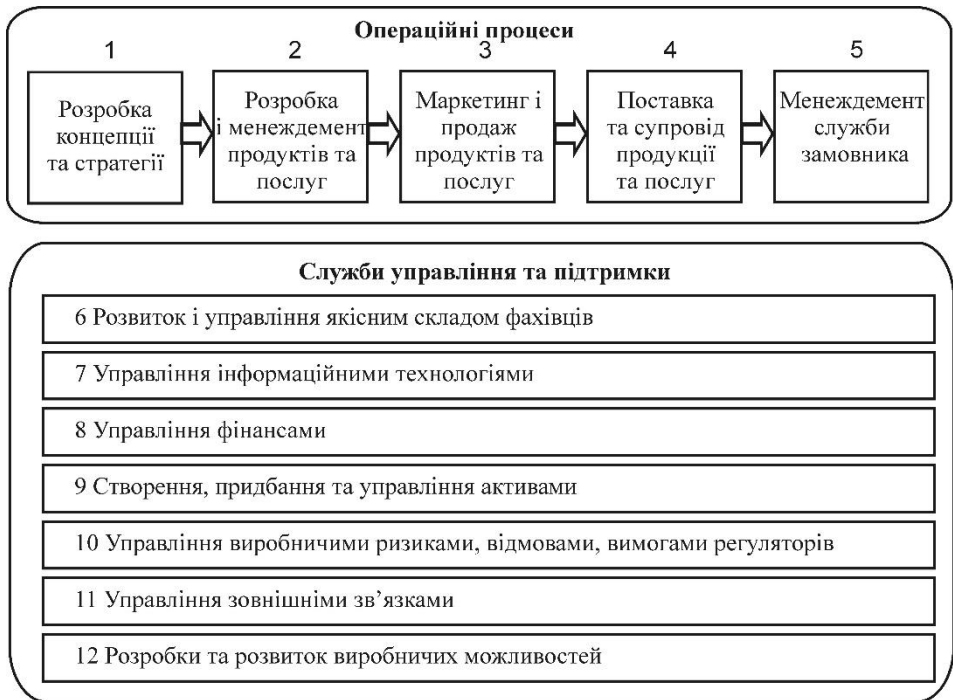


Рисунок 1 – Модель APQC для розробки функціоналу архітектури підприємства

Моделі APQC та ENAPS [18, 19] не відносяться до стандартних та мають проблеми з розумінням, але за сукупністю показників є найбільш відповідними для побудови загальної структури процесів, що лежать в основі імітаційного моделювання процесів розвитку розробок проектів в ІТ компаніях.

Всі процеси, що розглядаються, мають стохастичний характер, тому можна розглядати ймовірність їх виконання в сукупності та формувати ризики сценаріїв розвитку проектів.

Визначення кількісних показників ризику розвитку стадій життєвого циклу засноване на математичному моделюванні логічно пов'язаних процесів, що є характерними для компаній, що досліджуються, певних станових та економічних явищ, які призводять до прибутків або втрат при реалізації прийнятих рішень, та стохастичного впливу зовнішніх подій. При цьому математично прибуток або збиток відрізняється лише знаком за направленням наслідків. За означенням будемо враховувати збиткове направлення негативним, а прибуткове – позитивним.

Процеси розвитку компаній відносяться до стохастичних, однак, причинно-наслідкові зв'язки мають орієнтацію в послідовності та часі і можуть описуватись  $n$ -вимірним орієнтованим графом (орграфом). При цьому вершини графа відповідні до станів  $i$ -ї аналізованої величини, а дуги можуть бути зважені ймовірнісними кількісними показниками, що входять до математичної інформаційної моделі як стохастичні дані, так і іншими показниками, які необхідні для вирахування ризику та порівняльного процесу підтримки прийняття рішень.

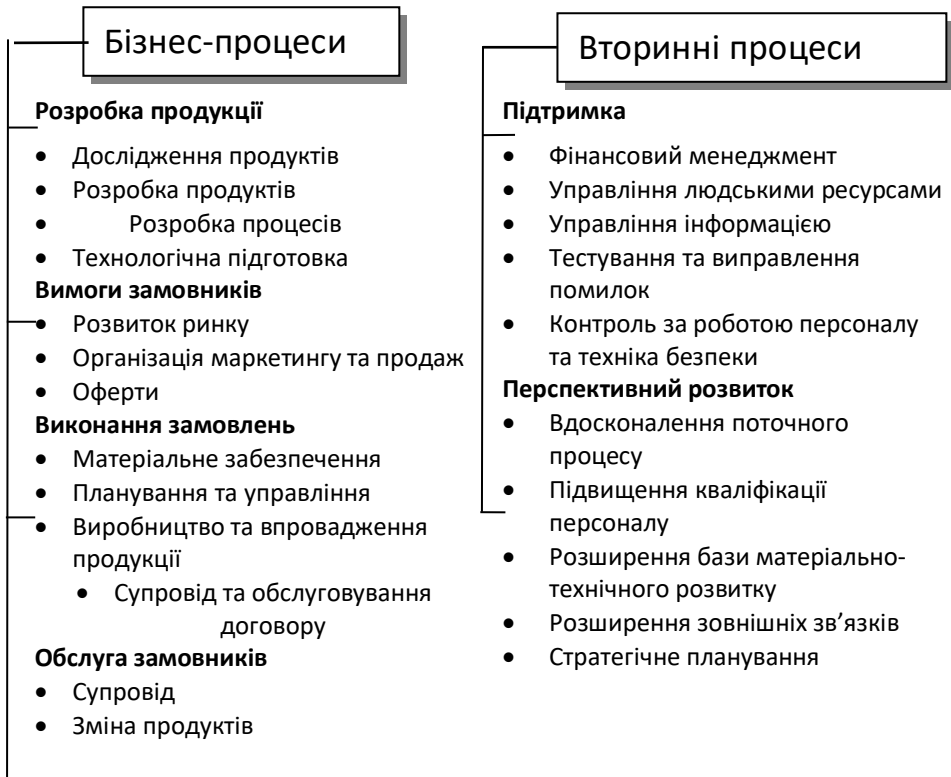


Рисунок 2 – Модель ENAPS для розробки функціоналу архітектури підприємства

Моделювання такого класу, поєднане в основі з моделями типу ENAPS та APQC, дозволяє урахувати не тільки логічні зв'язки в імітаційно-стадійній моделі, внутрішні події взаємного впливу прийнятих рішень, але й виконувати спрямований пошук в вимірах станів (*search in measurements of state*) поєднань сполучень сценаріїв розвитку компанії. При цьому можливо використання відомих інформаційних методів та моделей, наприклад класу IDEF [20-25]. У зв'язку зі спрямованістю орграфу станів, їх не можна віднести до класичних Марківських процесів, бо кожна зміна стану змінює також наслідки впроваджених рішень. Однак цілком можливо реалізувати пошук ейлерових ланцюгів орграфу, що дозволяє виконати пошук всіх можливих сценаріїв розвитку подій та визначити як ймовірність їх реалізації, так і провести кількісні оцінки прибутків та втрат при цьому.

Основна ціль моделювання IDEF3 – аналітичне описання процесів в певній послідовності, а також сумісних подій з можливістю представлення певних наслідків. При цьому використовуються два типи діаграм:

- діаграми описання послідовності стадій процесів (Process Flow Description Diagrams – PFDD);
- діаграми стану об'єктів та процесів його трансформацій (Object State Transition Network – OSTN).

Основні елементи моделювання такого класу базуються на: одиницях процесів (стадій); зв'язках; перехрестях; об'єктах посилань.

Приклад декомпозитивного сценарію моделі класу IDEF3 для простої стадії розробки функціонального ПЗ наведений на рис. 3.

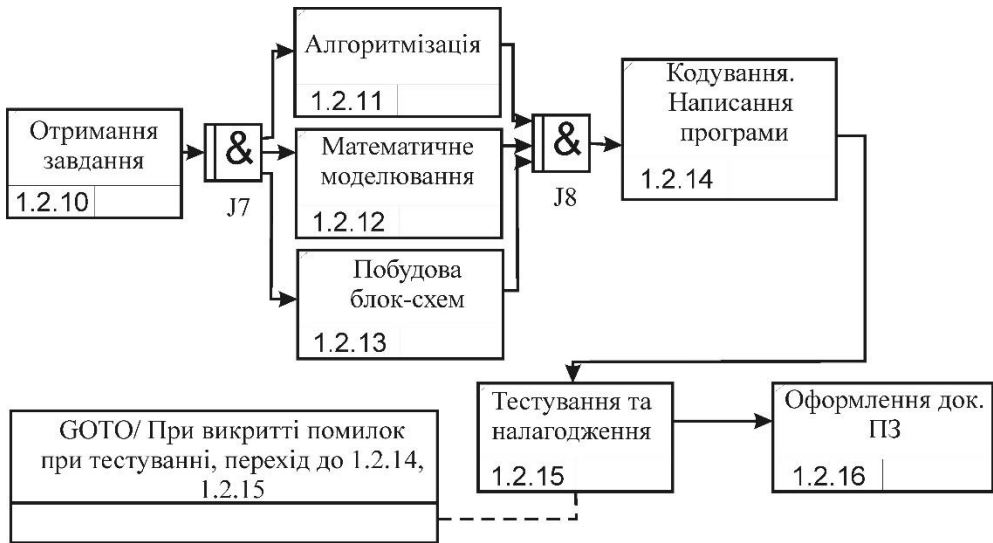


Рисунок 3 – Приклад моделювання розробки ПЗ класу IDEF3

Для повноти алгебри моделювання використовуються три основні типи перехресть: «&» – «та»; «О» – «або»; «X» – «виключне АБО».

Умови для повноцінного моделювання та вимоги для визначення кількісних значень ризику повинні складатися з урахуванням наступних особливостей:

1. Імовірність реалізації будь-якого *i*-го процесу, що досліджується, або події на різних стадіях розвитку компанії повинна бути врахована в певний проміжок часу. Тобто при декомпозиції окремих процесів потрібно враховувати їх дійсність відносно періоду їх дійсності.

2. Процеси, що моделюються, мають чітку логічну причинно-наслідкову залежність. У зв'язку з цим необхідно проводити моделювання в єдиній системі збору, обробки та представлення даних, що розподілені в заданій послідовності та часі.

3. Процеси, що описуються в моделях відповідних класів, мають властивості спільної, несумісної та взаємно незалежної реалізації. Необхідно враховувати ті обставини, що самі процеси можуть формувати нові прояви, обумовлені взаємним впливом одне на одного, та спрямованість їх в причинно-наслідковому зв'язку та часові обмеження можуть змінювати логіку розвитку сценаріїв.

4. Зважаючи на те, що процеси, що моделюються, мають різноманітні наслідки, аналіз ймовірності різних сценаріїв та первісних подій неприпустимо проводити тільки шляхом обробки статистичних даних сполучень. Такий підхід допустимий тільки для типових елементарних процесів, що можуть бути обчислені на основі напрацювань на відмову, або подібних методів, що відповідають характеру пуассонівських подій.

5. У зв'язку з природною дисперсією ймовірності елементарних подій, необхідно враховувати межі відхилення кількісних показників ймовірності та враховувати довірчий інтервал. При визначенні ймовірності отримання збитків, необхідно орієнтуватися на найбільш консервативні підходи до підрахунків (готуватися до гіршого).

6. Методи, що пропонуються для підтримки прийняття рішень задля отримання найбільшого очікуваного прибутку з урахуванням найменших можливих втрат та надійності реалізації позитивних сценаріїв розвитку компаній, повинні мати можливості моделювання структурно-послідовного характеру розвитку подій в компаніях, адекватних до застосування розробленої методології та області визначення даних в межах дійсності результатів та ясності поставлених цілей.

Методи моделювання з використанням описаних моделей повинні давати можливість побудови сценаріїв розвитку станів процесів розвитку ІТ компаній таким чином, щоб впровадити відбір найбільш раціональних рішень, оптимальних в сенсі Парето по декількох критеріях, зазначених експертами за перевагами (*Pareto-frontier*) в межах виважених показників ризику втрат та бажаних прибутків.

## Висновки

В результаті проведених досліджень були розроблені методи аналізу стохастичних і детермінованих складових ризику наслідків подій, що впливають на розвиток життєвого циклу розробок ІТ компаній.

Запропоновано концептуальний підхід та методи для вирішення завдань обробки інформації про стан ІТ компаній, який, на відміну від існуючих методів аналізу фінансового стану, дозволяє враховувати ймовірність реалізації сценаріїв розвитку процесів, що мають істотний вплив на наслідки злиття і поглинань.

Запропоновано методи оцінки ймовірності отримання прибутку або втрат і аналізу причин та наслідків прийнятих при цьому рішень.

Перспективність досліджень в цьому напрямку напряму зумовлена необхідністю розробки моделей, методів та інформаційної технології підтримки прийняття рішень задля позитивної зміни стану ІТ компаній на основі оцінки ризику, що дозволить впроваджувати найбільш ефективну стратегію розвитку ринку ІТ послуг.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Розвиток ІТ-галузі в Україні. Погляд збоку. <https://kreston-gcg.com/ua/development-of-the-it-industry-in-ukraine-a-side-view/> доступ 31.12.2019
2. "ISO/IEC/IEEE 12207:2017 - Information Technology - Software Life Cycle Processes". Standards catalogue. International Organization for Standardization. November 2017. Retrieved 21 June 2018.
3. SEI CMM - Capability Maturity Model (for Software). Модель CMM и ИСО 9001:2000 для организации качественной деятельности информационных служб. С.А. Волчков, И.В. Балахонова, В.В. Спиридонов. <http://www.interface.ru/fset.asp?Url=/misc/somecmm.htm> доступ 03.01.2020
4. ISO/IEC 15504 - Software Process Assessment "Standards Catalogue: ISO/IEC JTC 1/SC 7". Retrieved 2014-01-06.

5. Оценка и аттестация зрелости процессов создания и сопровождения программных средств и информационных систем (ISO/IEC TR 15504 CMM) / Пер. с англ. А.С. Агапов, С.В. Зенин, Н.Э. Михайловский, А.А. Мкртумян – М.: Книга и бизнес, 2001. – 348с. ISBN: 5-212-00884-0.
6. Project Management Institute. A guide to the project management body of knowledge (PMBOK guide). – Sixth edition. – Newtown Square, PA. – 1 online resource c. – ISBN 9781628253900
7. ISO/IEC TR 19759:2015 Software Engineering - Guide to the software engineering body of knowledge (SWEBOK)
8. ISO/IEC 12207:2008 Systems and software engineering - Software life cycle processes [https://ru.wikipedia.org/wiki/ISO/IEC\\_12207:2008](https://ru.wikipedia.org/wiki/ISO/IEC_12207:2008)
9. Алексеев В. І. Оцінка потенційної успішності веб-проекту на етапі неформальної постановки завдання / В. І. Алексеев, К. А. Алексеева // 10-та Відкрита наукова конференція ІМФН: Збірник матеріалів та програма конференції [«PSC-IMFS-10»], (Львів, 17–18 травня 2012 року) // Національний університет «Львівська політехніка». – Львів : Вид-во Національного університету «Львівська політехніка», 2012. – С. 111–112.
10. Кононенко, И. Разработка метода анализа информации для выбора оптимальной методологии управления проектом [Текст] / И. Кононенко, А. Харазий // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Т. 1. – № 13 (55). С. 4–7.
11. Берко А. Ю. Моделирование семантики неоднородных информационных ресурсов на основе метаданных / А. Ю. Берко, К. А. Алексеева // Интеллектуальные системы принятия решений і проблеми обчислювального інтелекту: Матеріали міжнародної наукової конференції. – Херсон : ХНТУ, 2012. – С. 33–35.
12. Тушавин В. А. Практическое использование проектного подхода для управления знаниями в современной ИТ-компании // Проблемы экономики. 2008. № 6. С. 112–114.
13. Сокол В.Є. Розробка та застосування інструментального засобу для дослідження ефективності впровадження систем управління ІТ-інфраструктурою університету (на прикладі НТУ «ХПІ») / В.Є. Сокол, М.В. Ткачук // Вісник НТУ "ХПІ" – Харків: НТУ "ХПІ". – 2013. – № 3 (977). – С. 71–83.
14. Tkachuk, N. An Integrated Development Framework for Advanced IT-Service Management: Proof-of-Concept Project in Universities Domain / N. Tkachuk, V. Sokol, K. Glukhovtsova // V. Ermolaev et al. (Eds.): ICTERI 2013: Revised Selected Papers, Series title: Communications in Computer and Information Science, Vol. 412.: Berlin: Springer-Verlag Heidelberg, 2013. – P. 50–69.
15. What are the Main Valuation Methods? [Электронный ресурс] / URL: <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/knowledge/valuation/valuation-methods/> (дата 12.08.2019)
16. Ramzaev M. Ocenka stoimosti IT-compayi: nadejnie metody // Analiticheskiy portal CNews. URL: <http://www.cnews.ru>, доступ 16.03.2014
17. Бадалова, А.Г. Управление рисками деятельности предприятия / А.Г. Бадалова, А.В. Пантелеев. – М.: Вузовская книга, 2015. – 236 с.
18. APQC Process classification framework (PCF): Version 7.0.4. 2016. April. URL: <http://www.apqc.org/pcf>.
19. Андерсен Б. Бизнес-процессы. Инструменты совершенствования / пер. с англ. С.В. Ариничева ; науч. ред. Ю.П. Адлер. Москва, 2003. (Серия “Практический менеджмент”). С. 26.
20. Грекул, В. И. Проектирование информационных систем / В. И. Грекул, Г. Н. Денищенко, Н. Л. Коровкина. – М.: Интернет-университет информационных технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 300 с.
21. Маклаков, С. В. Моделирование бизнес-процессов с All Fusion Process Modeler. – М.: Диалог-МИФИ, 2008. – 224 с.



22. Р 50.1.028-2001. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования. – М.: Госстандарт России, 2001. – 53 с.
23. IDEF3 // <http://en.wikipedia.org/wiki/IDEF3>
24. Mayer, R. J. Information Integration for Concurrent Engineering (IICE) IDEF3 Process Description Capture Method Report / R. J. Mayer, C. P. Menzel, M. K. Painter, P. S. deWitte, T. Blinn, B. Perakath. – Knowledge Based Systems, Inc., 1995. – 236 p.
25. Кельтон В. Имитационное моделирование. Классика CS. 3-е изд. / В. Кельтон, А. Лоу. – СПб.: Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2004. – 847 с.

## REFERENCES

1. Rozvytok IT-haluzi v Ukraini. Pohlyad z boku. <https://kreston-gcg.com/ua/development-of-the-it-industry-in-ukraine-a-side-view/> 31.12.2019
2. "ISO/IEC/IEEE 12207:2017 - Information Technology - Software Life Cycle Processes". Standards catalogue. International Organization for Standardization. November 2017. Retrieved 21 June 2018.
3. SEI CMM - Capability Maturity Model (for Software). Model' CMM i ISO 9001:2000 dlya organizatsii kachestvennoy deyatelnosti informatsionnykh sluzhnb. S.A. Volchkov, I.V. Balakhonova, V.V. Spiridonov. <http://www.interface.ru/fset.asp?Url=/misc/somecmm.htm> доступ 03.01.2020
4. ISO/IEC 15504 - Software Process Assessment "Standards Catalogue: ISO/IEC JTC 1/SC 7". Retrieved 2014-01-06.
5. Otsenka i attestatsiya zrelosti protsessov sozdaniya i soprovozhdeniya programmnykh sredstv i informatsionnykh sistem (ISO/IEC TR 15504 CMM) / Per. s angl. A.S. Agapov, S.V. Zenin, N.E. Mikhaylovskiy, A.A. Mkrtumyan – М.: Книга i biznes, 2001. – 348 с. ISBN: 5-212-00884-0.
6. Project Management Institute. A guide to the project management body of knowledge (PMBOK guide). – Sixth edition. – Newtown Square, PA. – 1 online resource c. – ISBN 9781628253900
7. ISO/IEC TR 19759:2015 Software Engineering - Guide to the software engineering body of knowledge (SWEBOK)
8. ISO/IEC 12207:2008 Systems and software engineering - Software life cycle processes [https://ru.wikipedia.org/wiki/ISO/IEC\\_12207:2008](https://ru.wikipedia.org/wiki/ISO/IEC_12207:2008)
9. Alyeksyeyev V. I. Otsinka potentsiynoyi uspishnosti veb-proektu na etapi neformal'noyi postanovky zavdannya / V. I. Alyeksyeyev, K. A. Alyeksyeyeva // 10-ta Vidkryta naukova konferentsiya IMFN: Zbirnyk materialiv ta prohrama konferentsiyi [«PSC-IMFS-10»], (L'viv, 17–18 travnya 2012 roku) // Natsional'nyy universytet «L'vivs'ka politekhnika». – L'viv : Vyd-vo Natsional'noho universytetu «L'vivs'ka politekhnika», 2012. – С. I11 – I12.
10. Kononenko, I. Razrabotka metoda analiza informatsii dlya vybora optimal'noy metodologii upravleniya proyektom [Tekst] / I. Kononenko, A. Kharazyi // Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy.– 2012. – Т. 1. – № 13 (55). С. 4–7.
11. Berko A. YU. Modelyuvannya semantyky neodnorodnykh informatsiynykh resursiv na osnovi metadanykh / A. YU. Berko, K. A. Alyeksyeyeva // Intelektual'ni systemy pryunyattya rishen' i problemy obchyslyval'noho intelektu: Materialy mizhnarodnoyi naukovoyi konferentsiyi. – Kherson : ХНТУ, 2012. – С. 33–35.
12. Tushavin V. A. Prakticheskoye ispol'zovaniye proyektного podkhoda dlya upravleniya znaniyami v sovremennoy IT-kompanii // Problemy ekonomiki. 2008. № 6. С. 112–114.
13. Sokol V.YE. Rozrobka ta zastosuvannya instrumental'noho zasobu dlya doslidzhennya efektyvnosti vprovadzhennya system upravlinnya IT-infrastrukturoyu universytetu (na prykladi NTU «KHPI») / V.YE. Sokol, M.V. Tkachuk // Visnyk NTU "KHPI" – Kharkiv: NTU "KHPI". – 2013. – № 3 (977). – С. 71–83.

14. Tkachuk, N. An Integrated Development Framework for Advanced IT-Service Management: Proof-of-Concept Project in Universities Domain / N. Tkachuk, V. Sokol, K. Glukhovtsova // V. Ermolaev et al. (Eds.): ICTERI 2013: Revised Selected Papers, Series title: Communications in Computer and Information Science, Vol. 412.: Berlin: Springer-Verlag Heidelberg, 2013. – P. 50–69.
15. What are the Main Valuation Methods? [Электронный ресурс] / URL: <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/knowledge/valuation/valuation-methods/> (дата 12.08.2019)
16. Ramzaev M. Ocenka stoimosti IT-compayi: nadejnie metody // Analiticheskiy portal CNews. URL: <http://www.cnews.ru>, доступ 16.03.2014
17. Badalova, A.G. Upravleniye riskami deyatel'nosti predpriyatiya / A.G. Badalova, A.V. Panteleyev. – M.: Vuzovskaya kniga, 2015. – 236 с.
18. APQC Process classification framework (PCF): Version 7.0.4. 2016. April. URL: <http://www.apqc.org/pcf>.
19. Andersen B. Biznes-protsessy. Instrumenty sovershenstvovaniya / per. s angl. S.V. Arinicheva ; nauch. red. YU.P. Adler. Moskva, 2003. (Seriya “Prakticheskiy menedzhment”). С. 26.
20. Grekul, V. I. Proyektirovaniye informatsionnykh sistem / V. I. Grekul, G. N. Denishchenko, N. L. Korovkina. – M.: Internet-universitet informatsionnykh tekhnologiy; BINOM. Laboratoriya znaniy, 2008. – 300 с.
21. Maklakov, S. V. Modelirovaniye biznes-protsessov s All Fusion Process Modeler. – M.: Dialog-MIFI, 2008. – 224 с.
22. P 50.1.028-2001. Informatsionnyye tekhnologii podderzhki zhiznennogo tsikla produktsii. Metodologiya funktsional'nogo modelirovaniya. – M.: Gosstandart Rossii, 2001. – 53 с.
23. IDEF3 // <http://en.wikipedia.org/wiki/IDEF3>
24. Mayer, R. J. Information Integration for Concurrent Engineering (IICE) IDEF3 Process Description Capture Method Report / R. J. Mayer, C. P. Menzel, M. K. Painter, P. S. deWitte, T. Blinn, B. Perakath. – Knowledge Based Systems, Inc., 1995. – 236 p.
25. Kel'ton V. Imitatsionnoye modelirovaniye. Klassika CS. 3-ye izd. / V. Kel'ton, A. Lou. – SPb.: Piter; Kiyev: Izdatel'skaya gruppa BHV, 2004. – 847 с.

*Стаття надійшла до редакції 12.10.2019.*

**А. О. ДРОБЯЗКО, Б. Б. ДУНАЄВ, О.О. ЛЮБІЧ**

## **МОДЕЛЮВАННЯ МОНЕТАРНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ВІДТВОРЕННЯ ЕКОНОМІКИ**

***Анотація.** У статті визначено, що економічна ситуація в Україні вимагає пошуку шляхів та інструментів прискорення темпів економічного розвитку для підвищення добробуту громадян із метою майбутньої інтеграції в європейський простір. Постійне зростання реального валового внутрішнього продукту можна забезпечити через розширене відтворення капіталу і пропорційне зростання кількості грошей в обігу при інфляційному саморегулюванні ринкової рівноваги та ставці податку на доходи виробництва, не вищій за оптимальну. Головним інструментом позитивного впливу центрального банку (ЦБ) на економіку є її реальна монетизація шляхом проведення продуктивної грошової емісії. Встановлено, що Україна має реальну монетизацію економіки набагато меншу, ніж країни-сусіди. Доведено необхідність перейти від фрагментарних, нав'язаних ззовні реформ до державної політики, заснованої на фундаментальних законах економіки та внутрішніх ресурсах із використанням можливостей міжнародного фінансового ринку та ринків товарів і грошей. Зроблено висновок, що рівновага економіки країни, тобто зростання реального ВВП, забезпечується регулюванням ЦБ рівноваги на ринку грошей та державним регулюванням розширеного відтворення використовуваного у сфері виробництва капіталу при саморегулюванні рівноваги на ринку благ за рівнем цін.*

***Ключові слова:** економіка, ринок, криза, праця, капітал, гроші, інфляція, фінанси, управління.*

**DOI: 10.35350/2409-8876-2019-17-4-99-117**

### **Вступ**

Розвиток економіки країни повинен забезпечувати достойне місце в міжнародному поділі праці, покращання добробуту широких верств населення, просування економічних перетворень задля забезпечення високих соціальних стандартів. Події останніх років вказують на зміну міждержавних економічних відносин у напрямі посилення національного протекціонізму провідних країн світу, що спричиняє суперечності за векторами США – Китай, США – Євросоюз, Великобританія – ЄС. Ринки втрачають стабільність, зростає непередбачуваність, що підвищує волатильність грошових агрегатів. Загострюються проблеми міждержавних боргів, які час від часу впливають на політичні процеси навіть у країнах так званого золотого мільярда. Україна опинилася у вкрай невідповідній економічній ситуації: за даними Групи Світового банку, у 2018 р. валовий внутрішній продукт (ВВП, GDP) був на рівні 130,8 млрд дол. США при населенні 42,3 млн осіб. Водночас у Польщі ці цифри становили 585,7 млрд дол. США (38,0 млн осіб), Чехії – 244,1 млрд дол. США (10,6 млн осіб), Угорщині – 155,7 млрд дол. США (9,8 млн осіб), Румунії – 239,5 млрд дол. США (19,6 млн осіб) [1].

Україні, наприклад, для досягнення нинішнього рівня Польщі за теперішніх темпів розвитку знадобиться 50 років. Тому потрібно шукати шляхи та інструменти прискорення темпів економічного розвитку наздоганяючої країни. На сьогодні у світовій практиці одними з ключових інструментів держави з фінансового управління макроекономічними процесами є сума готівки і депозитів до запитання і швидкість обігу грошей, які доповнюються бюджетно-податковими, амортизаційними, інвестиційними та ринковими інструментами. Для забезпечення сталого розвитку економіки країни з постійним зростанням реального ВВП необхідні розширене відтворення капіталу і кількість грошей в обігу, що відповідає за вартістю використовуваному у виробництві капіталу, при інфляційному саморегулюванні ринкової рівноваги [2]. Недостатній обсяг грошей в обігу призводить спочатку до депресії економіки, а потім до дефляції.

Якщо грошова пропозиція центрального банку (ЦБ) на ринку не відповідатиме рівню попиту на гроші в економіці, країна зазнаватиме проблем із кредитуванням реального сектору, інфляційними процесами, обмінним курсом валюти та прямими іноземними інвестиціями (ПІІ). Це особливо було відчутно у 2009 та 2014–2017 рр., коли Національний банк України (НБУ) надавав значні обсяги рефінансування банкам, тоді як останні не мали платоспроможного попиту з боку економіки, і надлишкова грошова маса чинила тиск на валютний ринок, а девальвація обмінного курсу негативно впливала на рівень інфляції. У результаті в останні роки Україна мала дуже високий рівень дефлятора ВВП. Інфляція була: 15,9% у 2014 р., 38,9% у 2015 р., 17,1% у 2016 р., 22,1% у 2017 р. [3]. Для її приборкання застосовувалась дуже жорстка монетарна політика (режим інфляційного таргетування за високої облікової ставки НБУ та обмеженого приросту грошової бази), яка призвела не тільки до стрімкого спаду економіки у 2014–2015 рр., а й до зниження інфляції у 2018 р. до 9,8%. Значно відставала Україна у 2017 р. за обсягом залучення ПІІ, тоді як у Польщі вони становили 7,4 млрд дол. США, Чехії – 7,4 млрд, Угорщині – 2,5 млрд, Румунії – 5,2 млрд, то в Україні – 4 млрд дол. США. Ця величина зіставна з аналогічним показником Грузії та Албанії (приблизно 2,0 млрд дол. США) [4–7]. Порівняльний розрахунок монетизації економік (відношення грошової маси (М3) до ВВП) становить в Україні 40,0%, Польщі – 73, Угорщині – 64, Чехії – 92%. Тобто для обслуговування економіки центральні банки емітували в національній валюті обсяги грошової маси, що еквівалентні в Україні 45 млрд дол. США, у Польщі 383 млрд, в Угорщині 89 млрд форинтів, у Чехії 199 млрд дол. США. Покращити цей показник Національний банк України не може, зважаючи на те, що вирішення цієї проблеми гальмується нерозвинутим фінансовим сектором, який не надає інструментів для продуктивного використання грошової маси як інвестиційного ресурсу. В Україні фондový ринок так і не став альтернативою банківським депозитам. Маючи монетизацію економіки, вдвічі нижчу, ніж в Угорщині й Румунії, у чотири рази меншу, ніж у Чехії, та у 8,5 раза, ніж у Польщі, наша країна програє економічні перегони сусіднім країнам [8].

Для виходу країни з кризи і забезпечення достойного рівня життя громадян необхідні узгоджені дії всіх інститутів державної влади, розвиток ринкової інфраструктури, захист прав власності. Фрагментарні реформи,

вужкопрофільні рішення, нав'язані ззовні, та інтереси відомств часто входять у суперечність одне з одним. Реформи, зафіксовані в Меморандумах України з МВФ, потрібні, щоб попередити чергову фінансову кризу, але недостатні для прискореного сталого розвитку країни. Фінансова стійкість держави повинна гарантуватися узгодженими діями інститутів влади й інструментами державної політики. Для досягнення мети прискореного розвитку країни варто перейти від фрагментарних реформ до державної політики, заснованої на фундаментальних законах економіки та внутрішніх ресурсах, із використанням міжнародних фондового ринку та ринків товарів і грошей.

Метою статті є визначення можливості досягнення Цілі сталого розвитку – “сприяння поступальному, всеохоплюючому та стійкому економічному зростанню” [9].

### 1. Тотожності обігу грошей в економіці

У фінансовому секторі реалізується спекулятивний попит на гроші через вторинні й третинні цінні папери фондових ринків. Він функціонує незалежно від реального сектору і впливає на нього тільки через перерозподіл спекулятивних грошей у виробництво, що обіцяє великі прибутки, і вилучення прибутку виробництва на шкоду реальному сектору [10]. У світовій економіці відтворення фінансово-кредитних ресурсів і активів відірвалося від відтворення виробничого капіталу, сталося замикання фінансового сектору на посередницькій діяльності.

Рівновага на ринку досягається рівністю попиту і пропозиції. В аналізованому періоді  $t$  на ринку товарів і послуг відношення ВВП номінального до ВВП реального визначає дефлятор ВВП, тобто індекс зміни рівня цін:

$$P_t = \omega_t / \Omega_t . \quad (1)$$

Зміна в році  $t$  рівня цін, що вимірюється дефлятором ВВП, щодо рівня цін попереднього року  $t - 1$ , прийнятого за одиницю, визначає інфляцію [2, 10, 11]. Рівновага на ринку товарів і послуг забезпечується рівністю вартості проданих благ і вартості куплених благ усіма економічними суб'єктами: сектором домогосподарств  $C$ ; сферою виробництва  $R_{\text{вп}}$ ; державою  $J_d$  та іншими країнами (різницею експорту  $E$  та імпорту  $Z$ ) [2, с. 77]:

$$\omega = P\Omega = C + R_{\text{вп}} + J_d + E - Z \text{ при } P > 1 . \quad (2)$$

Рівновага на ринку благ можлива за наявності інфляції,  $p = P - 1 > 0$ . За розглянутий період, зазвичай рік, виробники можуть отримати за продані блага таку суму грошей, якою володіють споживачі, тобто котра визначає грошовий сукупний попит, що дорівнює номінальному ВВП  $\omega$ ,

$$\omega = P_{\text{гр}} \bar{\Omega} , \quad (3)$$

де  $P_{\text{гр}}$  – грошовий дефлятор;  $\bar{\Omega}$  – реальний сукупний попит [10, с. 41].

Центральний банк створює в економіці країни кількість грошей в обігу, яка регулює макроекономічні процеси. Створення грошей дворівневою банківською системою визначається грошовою базою  $H$ , мінімальними резервами  $M_p$ , резервами  $P_n$  надлишковими, кредитами  $\Xi$  та депозитами  $D$  банків і готівкою  $M0$ . Грошова база дорівнює сумі мінімальних резервів, надлишкових резервів і готівки,  $H = M_p + P_n + M0$ . Депозити банків складаються з депозитів на вимогу  $D_1$ , строкових депозитів  $D_2$  і довгострокових депозитів  $D_3$ :  $D = D_1 + D_2 + D_3$ . У наявній протягом року на ринку грошей грошовій масі виокремлюються, крім готівки  $M0$ , три грошових агрегати:  $M1 = M0 + D_1$ ;  $M2 = M1 + D_2$ ;  $M3 = M2 + D_3$ . За швидкості  $\mu$  обігу грошей за розглянутий період умовою рівноваги на ринку грошей при забезпеченні відповідно до формули (3) рівності кількості грошей у річному кругообігу  $M1\mu$  сукупному попиту на ринку благ  $P_{гр}\bar{\Omega}$  є величина грошового дефлятора, не менша одиниці [2; 10]:

$$M1\mu = P_{гр}\bar{\Omega} \quad \text{при } P_{гр} \geq 1 . \quad (4)$$

Швидкість обігу грошей у грошовому кругообігу дорівнюватиме числу разів, коли в середньому за період підприємці отримують дохід  $M1$ :  $\mu = \omega / M1$ . Звідси попит економічних суб'єктів на гроші  $M^D$  протягом року за швидкості обігу грошей  $\mu$  визначається згідно з формулою (4) сумою готівки і депозитів до запитання:

$$M^D = M1 = P_{гр}\bar{\Omega} / \mu . \quad (5)$$

Кількість грошей в обігу  $M1\mu$  відповідно до формул (3) і (4) визначає й обмежує грошовий сукупний попит на ринку благ, тобто номінальний ВВП, і визначає рівновагу рівністю попиту та пропозиції [2; 10]:

$$\omega = P_{гр}\bar{\Omega} = P\Omega = M1\mu . \quad (6)$$

Звідси визначаються виробничий дефлятор – через відношення реального сукупного попиту до реальної пропозиції благ,  $P_{вр} = \bar{\Omega} / \Omega$ , і рівність дефлятора ВВП добутку грошового і виробничого дефляторів:

$$P = P_{гр} P_{вр} . \quad (7)$$

Згідно з формулами (3) і (5) грошовий дефлятор  $P_{гр}$ , змінюючи пропорційно суму  $M1$ , не впливає на швидкість обігу грошей  $\mu$ . Реальна вартість грошей тотожна відношенню суми  $M1$  до грошового дефлятора:

$$M^* \equiv M1 / P_{\text{гр}} . \quad (8)$$

Тобто неможливо змінити реальну вартість грошей, збільшивши чи зменшивши суми готівки і депозитів до запитання.

На підставі формули (6) відповідно до тотожності (8) ринку грошей доводиться тотожність кількісної теорії грошей  $\mu \equiv P\bar{\Omega} / M1$ , яка згідно з [11] була гіпотезою. За формулами (5) і (8) швидкість обігу грошей при реальному сукупному попиті  $\bar{\Omega}$  визначається тільки реальною вартістю грошей  $M^*$ , не залежить від суми готівки і депозитів до запитання  $M1$  і тотожна відношенню реального сукупного попиту до реальної вартості грошей:

$$\mu \equiv \bar{\Omega} / M^* . \quad (9)$$

Таким чином, зміна реального сукупного попиту зумовлює зміну реальної вартості грошей за незмінної швидкості обігу грошей.

Реальний сукупний попит  $\bar{\Omega}$  є функцією вартості  $K$  використовуваного у виробництві капіталу і коефіцієнта  $\sigma$  матеріалоемності виробництва [2, с. 81, 10, с. 66]:

$$\bar{\Omega} = \sigma K e^{-1} . \quad (10)$$

Тобто швидкість обігу грошей за наявної матеріалоемності виробництва відповідно до формул (9) и (10) визначається тільки вартістю  $K$  використовуваного у виробництві капіталу.

Графіки, наведені на рис. 1 фігурними лініями, відображають теоретичну залежність (9) швидкості  $\mu$  обігу грошей від зміни реальної вартості  $M^*$  грошей при реальному споживчому попиті  $\bar{\Omega}$ , відповідно до формули (10), що був в Україні в аналізовані роки (млрд грн): 2010 р.  $\bar{\Omega} = 965,25$ ; 2011 р.  $\bar{\Omega} = 1186,5$ ; 2012 р.  $\bar{\Omega} = 1325,7$ ; 2013 р.  $\bar{\Omega} = 1430,0$ ; 2014 р.  $\bar{\Omega} = 1429,0$ ; 2015 р.  $\bar{\Omega} = 1590,4$ ; 2016 р.  $\bar{\Omega} = 2110,3$ ; 2017 р.  $\bar{\Omega} = 2511,7$ .

Згідно з тотожністю (9) и графіками (рис. 1) зміна реального сукупного попиту з  $\bar{\Omega} = 965,25$  млрд грн до  $\bar{\Omega} = 1325,7$  млрд грн викликає зміну реальної вартості грошей з  $M^* = 200$  млрд грн до  $M^* = 275$  млрд грн за постійної швидкості обігу грошей  $\mu = 4,83$ . На графіках знаком  $\square$  позначено швидкість обігу грошей  $\mu$  по роках: 4,755 у 2010 р., 4,535 у 2011 р., 4,64 у 2012 р., 4,488 у 2013 р., 4,22 у 2014 р., 4,87 у 2015 р., 5,27 у 2016 р. і 5,94 у 2017 р.; згідно зі статистикою [3] значень ВВП  $\omega$  і суми  $M1$  готівки і депозитів до вимоги. Графіки і статистичні дані показують, що після початку кризи у 2010 р. и до 2013 р. реальна вартість грошей зберігалась постійною. Тому і курс валюти (грн/дол. США) був сталий: 7,935 у 2010 р., 7,954 у 2011 р., 7,991 у 2012 р. і 7,993 у 2013 р. Після стрімкого зниження курсу національної валюти у 2015 р. реальна вартість грошей зменшилась (грн/дол. США) – 25,553 у 2016 р. і 26,616 у 2017 р., у результаті чого збільшилась швидкість обігу грошей – до 5,27 у 2016 р. і 5,94 у 2017 р.

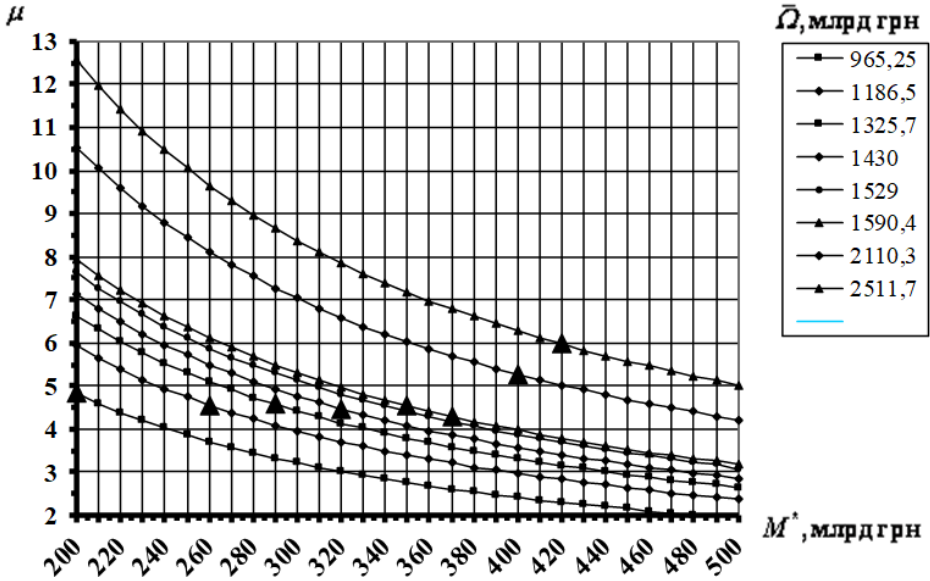


Рисунок 1 – Графіки швидкості  $\mu$  обігу грошей від реальної вартості грошей  $M^*$  при реальному сукупному попиті  $\bar{Q}$ . Побудовано за розрахунками авторів.

При балансі банківської системи  $\varepsilon = M3 - H - \Xi$  і наданих банками кредитах  $\Xi$  створення грошей виражається рівняннями:

$$H = M0 + M_p + P_n; \varepsilon = M3 - H - \Xi .$$

Якщо ввести коефіцієнти:  $(M_p + P_n) / D_1 = \alpha$  – встановлений ЦБ норматив резервів,  $M0 / D_1 = \beta$  – відношення готівки до депозитів на вимогу, то процес створення грошей банківською системою представляється рівняннями:

$$H = (\alpha + \beta) D_1; \Xi = M3 - H - \varepsilon . \tag{11}$$

Звідси впливає тотожність суми готівки і депозитів на вимогу  $M1$  добутку грошового мультиплікатора  $m = (1 + \beta) / (\alpha + \beta)$  і грошової бази  $H$ :

$$M1 \equiv mH . \tag{12}$$

Отже, неможливо змінити суму готівки і депозитів до запитання зміною грошової бази.

За наявних депозитів  $D_1$  на вимогу збільшити суму  $M1$  можна тільки за умови зростання готівки  $M0$ , тобто через підвищення інфляції. Кредити банків  $\Xi$  при річному фінансовому резерві  $\varepsilon > 0$  не можуть перевищувати згідно з (11) кредитну базу  $\bar{\Xi}$ ,



$$\bar{\Xi} = D - M_p - P_H . \quad (13)$$

При виданих комерційними банками кредитах  $\Xi$ , що перевищують наявні в них депозити  $D$ , балансом банківської системи  $\varepsilon = \bar{\Xi} - \Xi$  відповідно до (11) і (13) стає грошовий дефіцит,  $\varepsilon < 0$  при  $\Xi > D$ , настає кредитна криза.

Рівновага банківської системи, тобто позитивний баланс банківської системи,  $\varepsilon > 0$ , можливий згідно з рівнянням (11), коли кредити комерційних банків не перевищують різниці грошової маси і грошової бази,

$$\Xi \leq M3 - H . \quad (14)$$

Нарощуючи в разі кредитної кризи грошову базу  $H$ , ЦБ звужує кредитну базу та поглиблює кризу в найближчому майбутньому. На рис. 2 наведена динаміка кредитного портфеля юридичних осіб у 1998–2019 рр. у перерахунку за офіційним курсом НБУ, млрд дол. США. На прикладі 20-річного тренду динаміки обсягу кредитного портфеля юридичних осіб (рис. 2) проілюстровано, що непродуктивна емісія ЦБ через трансмісійний механізм спотворює рівновагу на валютному ринку, спричиняючи в майбутньому знецінення вже сформованих активів як банківської системи, так і загалом накопиченого капіталу.

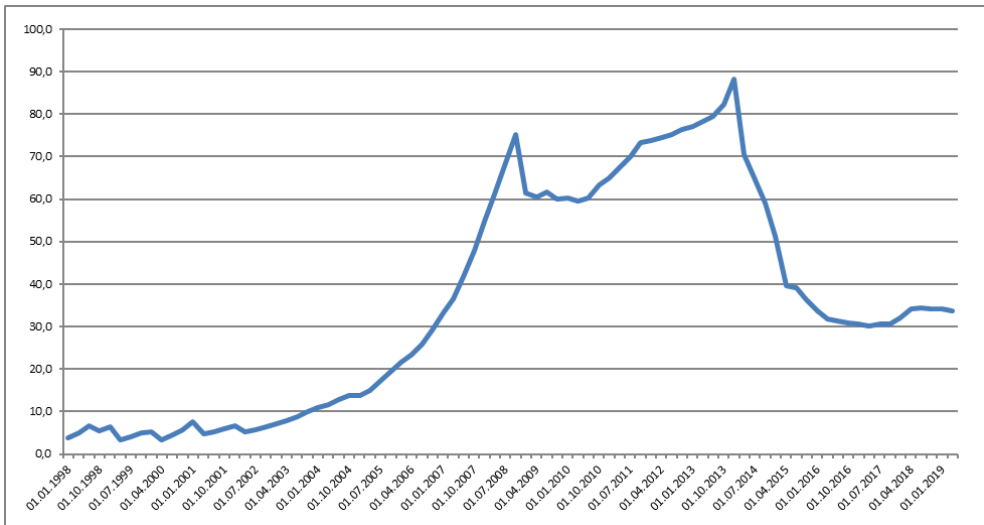


Рисунок 2 – Динаміка кредитного портфеля юридичних осіб у 1998–2019 рр. у перерахунку за офіційним курсом НБУ, млрд дол. США.  
Складено за даними Національного банку України.

Подолання кредитної кризи можливе тільки при збільшенні депозитів (довіри вкладників) і грошової маси. Депозити розширюють, відповідно до формули (13) кредитну базу, а грошова маса посилює можливість кредитування.

При виданих кредитах  $\Xi$  отримаємо суму готівки і депозитів до запитання  $M1^*$ , необхідну для угод купівлі-продажу,  $M1^* + D_2 + D_3 \geq \Xi + H$ .

Звідси, за формулою (12), визначається необхідна сума для угод купівлі-продажу:  $M1^* \geq mH - \varepsilon$ . За наявності резерву,  $\varepsilon \geq 0$ , спекулятивний попит на гроші у фінансовому секторі не впливає, згідно з (11), на суму  $M1$  для угод купівлі-продажу на ринку благ, оскільки  $M1 \equiv mH \geq M1^*$  при  $\varepsilon \geq 0$ , і на функціонування реального сектору. В разі кредитної кризи через участь комерційних банків у спекуляціях на фондових ринках фінансового сектору резерву немає,  $\varepsilon < 0$ , тому кількість грошей в обігу недостатня для проведення угод купівлі-продажу на ринку благ і повернення банкам кредитів,  $M1 \equiv mH < M1^*$  при  $\varepsilon < 0$ , а реальний сектор стикається з ризиком дефляції, тобто негативної інфляції.

Попит на гроші  $M^D$  економічних суб'єктів для угод купівлі-продажу залежно від рівноважної ставки процента  $i$  ЦБ, тобто ставки рефінансування, визначається функцією [10]:

$$M^D = M1 = P_{\text{гр}} \sqrt{0,5b\bar{\Omega}/i} , \quad (15)$$

де  $b$  – реальна вартість зняття грошей з рахунку в банку.

Центральний банк згідно з формулою (12) може запропонувати у відповідному періоді стільки грошей, скільки їх запитують:  $M^D = M1$ , і здійснювати за банківської рівноваги (14) регулювання з року в рік рівноваги на ринку грошей за формулою (4) наданими їм сумою  $M1$  депозитів до вимоги і готівки та ставкою процента  $i$ . Кількість готівки залежить від продуктивної грошової емісії ЦБ, яка визначає кількість емітованих грошей, спрямованих на викуп ЦБ виручки експортерів за рахунок інтервенцій у період перевищення пропозиції над попитом, а також частини прямих іноземних інвестицій, що надійшли у виробничу сферу на відтворення капіталу. Та частина прямих іноземних інвестицій, що спрямовується на фондові ринки фінансового сектору, а також на рефінансування банків, є непродуктивною емісією. Рівноважна ставка процента  $i$  визначається згідно з формулами (5) і (15) швидкістю обігу грошей:

$$i = 0,5\mu^2 b / \bar{\Omega} . \quad (16)$$

При кошторисі зняття грошей у банках  $b/\bar{\Omega} = 0,01$  та ставці рефінансування  $i = 0,01$  маємо швидкість обігу грошей:  $\mu = \sqrt{2}$ . При ставці рефінансування менше 1% регулююча функція швидкості обігу грошей втрачається. Відповідно до формули (16), при ставці  $i = 0,005$  рефінансування ЦБ та кошторисі зняття грошей у банках  $b/\bar{\Omega} = 0,01$  маємо швидкість обігу грошей  $\mu = 1$ . Тому центральні банки високорозвинутих країн не можуть досягнути регламентованої інфляції у 2% при ставці рефінансування менше 0,5% без збільшення готівки в обігу.

## 2. Тотожність сталого розвитку економіки

Рівновага економіки країни забезпечується зростанням реального ВВП [2, 10]. Відношення реального ВВП року  $t$  до номінального ВВП попереднього року  $t - 1$  вимірюється згідно з формулою (3) зміни реального ВВП у цінах попереднього року:

$$\delta_t = \Omega_t / (P_{t-1}\Omega_{t-1}) - 1 . \quad (17)$$

Спад реального ВВП, тобто  $\delta_t < 0$ , означає порушення рівноваги, економічну кризу. Регулювання рівноваги економіки країни, тобто зростання реального ВВП, забезпечується шляхом регулювання ЦБ рівноваги на ринку грошей та державного регулювання розширеного відтворення використовуваного у сфері виробництва капіталу при саморегулюванні рівноваги на ринку благ за рівнем цін [2; 10]. Сукупний попит згідно з формулою (2) залежить від попиту виробничого сектору на капітал, тобто від інвестицій у виробництво  $R_{вр}$ . Попит виробництва на інвестиції визначається амортизацією  $A$  використовуваного у сфері виробництва капіталу вартістю  $K$  і чистими інвестиціями  $J_ч$ ,  $R_{вр} = A + J_ч$ . Основним джерелом інвестицій у виробництво є амортизаційні відрахування  $A = P\theta K$  з використовуваного у виробництві капіталу при нормі амортизації  $\theta$ . Чисті інвестиції  $J_ч$  є частиною чистого прибутку  $\mathcal{Ч} = J_ч + D_{дг}$  виробництва з використовуваного капіталу, інша частина  $D_{дг}$  є доходом домашніх господарств із капіталу, тобто їхнім дивідендним доходом. Інвестиції, більші за амортизацію, забезпечуються чистими інвестиціями. Джерелом зростання реального ВВП, збільшення наявного у виробництві капіталу  $K_{вр}$  і підвищення сукупного попиту є одержуваний виробництвом прибуток  $\pi$  з використовуваного капіталу  $K$ . Реальний чистий прибуток при ставці  $\chi$  податків  $\Pi_{вр} = \chi Y$  визначається функцією:

$$\mathcal{ч} = \mathcal{Ч} / P = (1 - \chi)(\Omega - \theta K) - wB,$$

де  $w = W / P$  – ставка реальної зарплати,  $B$  – кількість працюючих у виробництві. Чисельність  $B$  працюючих у виробництві є часткою працюючих  $N$  у економіці, тобто  $B = \xi N$ . При виплаченій у виробництві зарплаті  $wB$  завжди існує норма амортизації простого відтворення капіталу  $\bar{\theta} = [\Omega - wB / (1 - \chi)] / K$  і визначається закон чистого прибутку:

$$\mathcal{ч} = K(1 - \chi)(\bar{\theta} - \theta) .$$

Від ставки податків на виробництво залежать прибуток виробництва і відрахування до бюджету. Одночасне зниження податкового тягаря на виробництво та збільшення надходжень до державного бюджету є предметом розгляду «теорії пропозиції» [12, с. 122; 13]. Теоретичною основою зниження

ставки податків на виробництво є умоглядна гіпотетична «крива Лаффера», яка відображає залежність між податковими надходженнями в бюджет і податковою ставкою. Умоглядна концепція кривої має на увазі наявність ставки податків з максимальним доходом бюджету, після якого надходження в бюджет починають зменшуватися при збільшенні ставки податків. При нульовій і стовідсотковій податковій ставці податкові надходження до державного бюджету дорівнюють нулю, а в деякій точці, що знаходиться між нулем і 100%, ці надходження досягають свого максимального значення. Однак, обіцянки економічної «теорії пропозиції» не реалізувалися, податкові збори на практиці різко скорочуються в порівнянні з рівнем без скорочення податків. Цей факт визнав і сам А. Лаффер, а Грегорі Менк'ю для опису очікувань в «теорії пропозиції» збільшення податкових зборів при зменшенні податкової ставки використовував термін «економіка фантазій» [14]. Доведено в [15], що існує оптимальна ставка податків  $\chi_{opt}$ , за якої чистий прибуток після сплати податків  $Ч^*$  дорівнює цим податкам  $Ч^* = H_{вр}^* = \chi_{opt} Y$  і забезпечується сталя з року в рік зростання виробництва і доходів державного бюджету. При ставці податків менше оптимальної,  $\chi < \chi_{opt}$ , забезпечується прискорений розвиток економіки і скорочуються відрахування до бюджету, а при ставці, більшій за оптимальну,  $\chi > \chi_{opt}$ , стримується розвиток економіки і збільшуються відрахування до бюджету.

При нормі амортизації простого відтворення капіталу,  $\theta = \bar{\theta}$ , і інвестиціях, менших від амортизації,  $R_{вр} < A$ , можливе тільки звужене відтворення капіталу. Межею норми амортизації є норма вибуття капіталу з експлуатації  $\theta_{виб}$ , що визначається його фізичним зносом і моральним старінням. У межах  $\theta_{виб} < \theta < \bar{\theta}$  здійснюється прискорена амортизація капіталу, яка стимулюється пільговим оподаткуванням. Норма амортизації, менша від норми вибуття,  $\theta < \theta_{виб}$ , знижує наявний у сфері виробництва капітал на величину недоамортизації,  $\Delta = (\theta_{виб} - \theta)KP$ , тому вартість наявного у виробництві капіталу, що враховується національною системою бухгалтерського обліку, визначається функцією:

$$K_{прt} = P_{t-1}K_{прt-1} + J_{чt-1} - \bar{\Delta}_{t-1}, \quad (18)$$

де  $\bar{\Delta} = \Delta - J_i$  – різниця недоамортизації капіталу  $\Delta$  і закордонних інвестицій у сферу виробництва  $J_i$ .

У реальній економіці капітал у сфері виробництва використовується не повністю, а залежно від кон'юнктури сукупного попиту пропорційно коефіцієнту використання  $\upsilon$ ,  $K = \upsilon K_{вр}$  [10, 11, 15]. Підприємці регулюють обсяги виробництва в році  $t$  за обсягом продажу в попередніх роках через зміну кількості працюючих  $V_t$  відносно кількості в попередньому році  $V_{t-1}$  згідно з кон'юктурою сукупного попиту  $\mathfrak{R}_t$ ,

$$B_t = \mathfrak{R}_t B_{t-1} \quad . \quad (19)$$

Кон'юнктурна зміна підприємцями кількості працюючих зумовлює пропорційну зміну використання капіталу,

$$v_t = v_{t-1} \mathfrak{R}_t = v_{t-1} B_t / B_{t-1} \quad . \quad (20)$$

Ринкова рівновага в економіці виникає при рівновазі на ринках грошей і благ і за наявності безробіття на ринку праці [2; 10, 15]. Фактичне безробіття дорівнює різниці повної зайнятості населення в економіці  $N_0$  і фактичної кількості  $N$  працюючих:

$$f_\phi = N_0 - N \quad . \quad (21)$$

На ринку праці настає рівновага за відсутності безробіття, тобто при  $f_\phi = 0$ . Звідси визначається рівень фактичного безробіття:

$$\phi = f_\phi / N_0 = (N_0 - N) / N_0 \quad . \quad (22)$$

При ставці реальної зарплати:  $w \geq 12\delta / (1+n)$ , де  $\delta = D_{\text{дг}} / (TP)$  – реальний дохід домашніх господарств із капіталу на одного жителя країни;  $T$  – чисельність населення;  $n$  – ставка пенсійного податку із зарплати, пропозицію праці можна прийняти такою, що дорівнює повній зайнятості населення:  $N_0 \approx N^S [w = 12\delta / (1+n)] = 0,46T$  [2; 10].

Значну частину витрат у економіці становлять виплати із пенсійного (життєвого) забезпечення населення Ж через пенсійний фонд. Виплата зарплати  $W_d$  державних службовців та оплата потреб  $J_d$  держави в матеріальних благах у формулі (2) і витрати на соціальне забезпечення жителів  $З$  визначають витрати державного бюджету  $G$ :

$$G = W_d + J_d + З \quad . \quad (23)$$

Джерелом доходу державного бюджету  $D_б$  і пенсійного забезпечення Ж є податки в економіці  $\Pi_{\text{вр}}$  і податки  $\Pi_{\text{дг}}$ , які справляються з доходу домашніх господарств із капіталу та нерухомості,

$$D_б + Ж = \Pi_{\text{вр}} + \Pi_{\text{дг}} \quad . \quad (24)$$

Сума податків із доходу домашніх господарств з капіталу та нерухомості і з доходу виробництва за вирахуванням пенсійного забезпечення є доходом державного бюджету:

$$D_б = \Pi_{\text{вр}} + \Pi_{\text{дг}} - Ж \quad . \quad (25)$$

За бездефіцитного державного бюджету витрати бюджету  $G$  дорівнюють доходам,  $G = D_6$ . Якщо виплати домашнім господарствам із соціального забезпечення  $Z$  дорівнюють податкам, які стягуються з доходу домашніх господарств з капіталу та нерухомості, то споживання домогосподарств збалансоване:  $Z_{зб} = \Pi_{дг}$ . Бездефіцитний бюджет,  $G = D_6$ , збалансований за споживанням домашніх господарств, має витрати, котрі дорівнюють сумі податків з доходу виробництва і соціальних виплат за вирахуванням пенсійного забезпечення  $Ж$ :

$$G = \Pi_{вр} + Z_{зб} - Ж. \quad (26)$$

Звідси отримуємо суму витрат на зарплату  $W_d$  державних службовців та оплату  $J_d$  державного споживчого попиту на матеріальні блага за бездефіцитного бюджету, збалансованого за споживанням домашніх господарств, що дорівнює податку з доходу виробництва за вирахуванням пенсійного забезпечення:

$$W_d + J_d = \Pi_{вр} - Ж \text{ при } Z = H_{дг}. \quad (27)$$

Якщо виключити амортизацію  $A$  з ВВП і споживчого попиту, згідно з формулою (2) отримуємо величину доходу виробництва,

$$Y = C + J_ч + J_d + E - Z. \quad (28)$$

Дохід виробництва дорівнює сумі зарплати, виплаченої у сфері виробництва, чистого прибутку і податків, сплачених підприємцями:  $Y = W_{вр} + Ч + \chi Y$ .

Звідси споживчий попит домашніх господарств відповідно до формули (27) можна виразити функцією:

$$C = W_{вр} + \chi Y - J_d + D_{дх} + Z - E. \quad (29)$$

Дефіцитний споживчий попит держави  $J_d^*$  при збалансованому споживанні домашніх господарств, або збалансований споживчий попит держави, дорівнює податку з доходу виробництва  $\Pi_{вр} = \chi Y$  за винятком зарплати в невиробничій сфері  $W_d = WB(1 - \xi)$  і пенсійного забезпечення домашніх господарств  $Ж = WBn$ :

$$J_d^* = \chi Y - WB(1 - \xi + n). \quad (30)$$

Споживання домашніх господарств збалансоване згідно з формулою (27), якщо податок з доходу виробництва за винятком державного споживчого попиту (30) дорівнює виплаченій протягом року зарплаті в невиробничій сфері та пенсійному забезпеченню домашніх господарств

$\chi Y - J_d^* = WB(1 - \xi + n)$ . Звідси отримаємо згідно з формулою (29) закон збалансованого споживання домогосподарств:

$$C_{зБ} = WB(1 + n) + D_{дх} + Z - E . \quad (31)$$

Підставивши у формулу (2) значення  $C_{зБ}$  і  $R_{пр} = A + J_ч$ , одержимо рівняння балансу економіки при збалансованому споживанні домашніх господарств:

$$\omega = P[wB(1 + n) + \theta K + ч] + J_d^* . \quad (32)$$

Відповідно до рівняння балансу економіки (32), збільшення виплачуваної зарплати можливе за рахунок зменшення чистого прибутку і зменшення споживчого попиту держави.

Попит на працю визначається ринковою кон'юнктурою  $\mathfrak{R}_t$  згідно з формулою (18):  $V_t = \mathfrak{R}_t V_{t-1}$ . При регульованій підприємцями за кон'юнктурою попиту кількості працюючих грошовий споживчий попит (32) у році  $t$  визначається функцією:

$$\omega = KP[\bar{\theta} - \chi(\bar{\theta} - \theta)] + PwB_{t-1}\mathfrak{R}(1 + n) + J_d^* .$$

Звідси випливає, що ринкове саморегулювання рівноваги на ринку благ за кон'юнктурою попиту визначає дефлятор ВВП:

$$P = \frac{J_d^*}{\Omega - wB_{t-1}\mathfrak{R}(1 + n) - \theta K - ч} . \quad (33)$$

При збалансованому споживанні домашніх господарств (31) державний бюджет є бездефіцитним, тобто його видатки дорівнюють доходам  $G = D_6$ , якщо витрати на зарплату державних службовців і на бездефіцитний споживчий попит держави  $\bar{J}_d^*$  дорівнюють податку з доходу виробництва за вирахуванням пенсійного забезпечення,

$$\bar{J}_d^* + P_6 w(1 - \xi)B = \chi Y_6 - P_6 wBn , \quad (34)$$

де  $P_6$  – дефлятор ВВП при бездефіцитному бюджеті.

Державний бюджет можна збалансувати за бездефіцитним споживчим попитом держави при заданій ставці зарплати  $w$  або заданому дефіцитному споживчому попиту держави за збалансованою ставкою зарплати  $\bar{w}$ . При бездефіцитному, згідно з формулою (34), споживчому попиту держави, підставивши значення чистого прибутку відповідно до формули (17) і амортизації капіталу  $A = P_6 \theta K$ , виразимо грошовий споживчий попит:

$$P_6 \Omega = P_6 \{wB(1+n) + (1-\chi)(\Omega - \theta K) - wB + \theta K\} + \bar{J}_d^* .$$

Звідси  $\chi P_6 \Omega = P_6 [wB(1+n) + \chi \theta K - wB] + \bar{J}_d^*$ , і після перетворень отримаємо грошовий споживчий попит за бездефіцитного бюджету:

$$P_6 \Omega = P_6 [wB(1+n-\xi) / \chi + \theta K] + \bar{J}_d^* / \chi . \quad (35)$$

Бездефіцитний споживчий попит держави визначається за формулами (34) і (35) функцією:

$$\bar{J}_d^* = P_6 [\chi(\Omega - \theta K) - wB(1+n-\xi)] . \quad (36)$$

Згідно з формулою (32) бездефіцитний споживчий попит держави можна також виразити функцією:

$$\bar{J}_d^* = P_6 [\Omega - wB(1+n) - \theta K - \text{ч}] . \quad (37)$$

Звідси визначається тотожність сталого розвитку економіки:

$$\chi(\Omega - \theta K) - wB(1+n-\xi) \equiv \Omega - wB(1+n) - \theta K - \text{ч} . \quad (38)$$

Таким чином, баланс економіки при збалансованому споживанні домашніх господарств тотожний бездефіцитному споживчому попиту держави.

Справді, після перетворень отримаємо тотожність реального чистого доходу із сумою реальних чистого прибутку й виплаченої зарплати:

$$(1-\chi)(\Omega - \theta K) \equiv \text{ч} + wB\xi .$$

За формулами (32) і (37) отримаємо при збалансованому споживанні домашніх господарств функцію бездефіцитного споживчого  $\bar{J}_d^*$  попиту держави від збалансованого споживчого попиту держави [10]:

$$\bar{J}_d^* = J_d^* P_6 / P . \quad (39)$$

Тобто при збалансованому споживанні домашніх господарств реальний споживчий попит держави є постійною величиною, яка не залежить від інфляції:  $J_d^* / P = \bar{J}_d^* / P_6 = \text{const}$ .

Регульовані державою чисті інвестиції залежать від отриманого прибутку, потреб неvirобничої сфери та дефіциту бюджету. При заданих державним бюджетом  $\chi, n, \theta, \xi$  збалансований споживчий попит держави  $J_d^*$  за формулою (32) можна збільшити через зменшення ставки зарплати  $w$ ,



тобто споживання домогосподарств (31), за рахунок зменшення чистого прибутку  $Ч$  і зниження норми амортизації капіталу  $A$ .

Збалансований споживчий попит держави  $J_d^*$ , збільшений порівняно з бездефіцитним попитом  $\bar{J}_d^*$ , призводить до реального дефіциту бюджету  $b = (G - D) / P$ , вимірюваного реальною різницею витрат  $G$  і доходів  $D$ . Взаємозв'язок реальної грошової маси, бюджетного дефіциту і рівня оподаткування розглянуто в роботі [16]. За бездефіцитного бюджету номінальний ВВП визначається функцією (35). При дефіцитному бюджеті згідно з формулою (6) грошовий споживчий попит визначається сумою бездефіцитного споживчого попиту  $P_6\Omega$  і номінального дефіциту бюджету  $P_6b$ , тобто визначаються функції:

- грошового споживчого попиту:

$$M1\mu = P\Omega = P_6(\Omega + b) = \Omega P_6(1 + b/\Omega) \quad (40)$$

- дефлятора ВВП:

$$P = P_6(1 + b/\Omega). \quad (41)$$

При дефіциті бюджету,  $b > 0$ , абсолютний рівень цін збільшується на відносний дефіцит бюджету і відбувається знецінення грошей за стабільної ринкової рівноваги, яке пропорційне грошовому дефлятору:

$$P_{гр} = \Omega P_6(1 + b/\bar{\Omega}) / \bar{\Omega}, \quad (42)$$

а за нестабільної ринкової рівноваги – пропорційно дефлятору ВВП.

При профіциті бюджету,  $b < 0$ , згідно з функцією (40) зменшиться грошовий споживчий попит  $P\Omega = P_6\Omega - b = \Omega(P_6 - b/\Omega)$ .

Абсолютний рівень цін зменшується на відносний профіцит бюджету і відбувається подорожчання грошей за стабільної ринкової рівноваги пропорційно грошовому дефлятору  $P_{гр} = \Omega P_6(1 + b/\bar{\Omega}) / \bar{\Omega}$ , а за нестабільної ринкової рівноваги – пропорційно дефлятору ВВП  $P = P_6(1 + b/\Omega)$ . Для розрахунку збалансованого споживчого попиту держави згідно з формулою (39) необхідно визначити за виразом (37) бездефіцитний споживчий попит держави  $\bar{J}_d^*$  і при заданому відносному дефіциті бюджету  $b/\Omega$  визначити згідно з формулою (41) дефлятор бездефіцитного бюджету  $P_6$ :

$$P_6 = P / (1 + b/\Omega). \quad (43)$$

Відносний дефіцит бюджету, відповідно до виразів (39) і (43), дорівнює темпу спричиненої ним зміни дефлятора ВВП і споживчого попиту держави,

$$b/\Omega = P/P_6 - 1 = J_d^*/\bar{J}_d^* - 1 = J_d/J_d^* - 1. \quad (44)$$

Отже, дефіцит бюджету визначає темп викликаної ним зміни дефлятора ВВП (інфляції) відносно дефлятора бездефіцитного бюджету і не може за збалансованого споживання домашніх господарств змінити реальний споживчий попит держави.

При відомих  $\omega$ ,  $P$ ,  $\mathcal{C}$ ,  $A$ ,  $wB$ , відповідно до Зведених національних рахунків [3], заданих державним бюджетом пенсійному податку  $n=0,32$  і коефіцієнту працюючих у виробництві  $\xi=0,75$ , дефіциту бюджету  $b$  [17], можна визначити збалансований споживчий попит держави за формулою (32), відносний дефіцит бюджету  $b/\Omega$ , дефлятор бездефіцитного бюджету згідно з формулою (43) і бездефіцитний споживчий попит держави  $\bar{J}_d^*$  за формулою (39).

У таблиці проведено вимірювання дефлятора бездефіцитного бюджету економіки України в 2010–2017 рр. і співвідношення податкових надходжень в економіці та ВВП за статистичними даними [3; 17].

У 2010 р., згідно з формулою (32), спостерігався збалансований попит держави (млрд грн):  $J_d^* = 1079,35 - 518,184 \times 0,75 \times 1,32 - 433,637 = 132,71$ . Дефлятор бездефіцитного бюджету визначається відповідно до формули (41):  $P_6 = P/(1+b/\Omega)$ . У 2010 р.  $b/\Omega = 0,0594$ , тому отримуємо дефлятор бездефіцитного бюджету  $P_6 = 1,073$ . Бездефіцитний попит держави  $\bar{J}_d^*$  і попит держави  $J_d$  визначаються за формулою (44), тому у 2010 р.:  $\bar{J}_d^* = J_d^*/(1+b/\Omega) = 121,15$  млрд грн;  $J = J_d^*(1+b/\Omega) = 140,59$  млрд грн. Так само проведено вимірювання дефлятора бездефіцитного бюджету в 2011–2017 рр.

Відповідно до статистичних даних, наведених у [17], сума доходів бюджету  $D_6$  і надходжень до пенсійного фонду  $\mathcal{J}$  визначає податкові надходження в економіці, тобто податковий тягар, який можливо оцінити співвідношенням до ВВП,

$$\chi_\omega = (D_6 + \mathcal{J})/\omega. \quad (45)$$

У табл. 1 наведені розрахунки ставки  $\chi_\omega$  податків на виробництво за формулою (45). Податки на виробництво впродовж 2010–2017 рр. на 6–7% перевищували оптимальне значення  $\chi_{\text{опт}} = 23\%$ , тобто щороку можливі були додаткові чисті інвестиції у виробництво обсягом приблизно 200 млрд грн у 2017 р.

Таблиця 1 – Розрахунки дефлятора бездефіцитного бюджету (млрд грн) і ставки податків у економіці

Показники	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
<i>Статистичні дані</i>								
ВВП, $\omega$	1079,3	1300,0	1404,7	1 465,2	1 586,9	1 988,5	2 385,4	2 983,9
Дефлятор, $P$	1,137	1,142	1,078	1,043	1,159	1,389	1,171	1,221
Нагромадження капіталу	183,87	229,40	266,8	247,05	224,33	269,42	368,69	470,327
Оплата праці $WN$ , млрд грн	518,18	610,62	705,84	730,65	734,94	777,65	873,83	1170,7
Валовий прибуток	433,637	508,046	518,017	550,222	647,781	894,987	1 142,2	1 345,9
Податкові надходження до бюджету, $D_b$	277,573	366,77	393,944	394,613	405,644	576,041	745,187	948,219
Доходи пенсійного фонду, $J$	119,34	139,056	157,98	166,864	165,923	169,874	111,707	158,91
Відносний дефіцит бюджету $b/\Omega$ , %	5,94	1,79	3,79	4,45	4,98	2,28	2,94	1,6
<i>Розрахункові дані</i>								
Чистий прибуток, $Ч$	249,77	278,64	251,22	303,17	423,45	625,59	773,51	875,57
Збалансований попит, $J_d^*$	132,71	187,45	187,88	191,63	211,55	323,64	378,11	478,96
Бездефіцитний дефлятор, $P_b$	1,073	1,122	1,039	0,999	1,104	1,36	1,138	1,201
Бездефіцитний попит, $\bar{J}_d^*$	121,15	184,15	174,21	183,47	201,51	316,43	367,31	471,42
Попит держави, $J_d$	140,59	190,8	195,0	200,16	222,09	331,02	389,23	486,62
Податковий тягар, $\chi_\omega$ %	36,77	38,91	39,29	38,32	36,02	37,51	35,92	37,1

Розраховано та складено за: Зведені національні рахунки за 2017 рік / Державна служба статистики України. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua>; Виконання державного бюджету України в 2019 р. Мінфін. 2019. 26 черв. URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/finance/budget/gov/2019/>.

Серед світових тенденцій у сфері оподаткування можна відзначити зниження ставок податків. Так, середня ставка податку на доходи корпорацій 17 країн ОЕСР в 1990 р. становила 41,8%, у 1997 р. – 38,3%, а в 2006 р. - вже 30,8%. Протягом 2007–2011 рр. ставки цього податку не так стрімко, але продовжували знижуватися [18].

## Висновки

Сталий розвиток економіки країни передбачає забезпечення розширеного відтворення виробничого капіталу, а також регулювання кількості грошей в обігу за досягнутої вартості вкладеного капіталу, а також оптимальної ставки

податків у економіці і застосування заходів інфляційного регулювання ринкової рівноваги. Податковий тягар в Україні є доволі високим, що гальмує розвиток економіки України, а тому він потребує зниження. Водночас недостатня кількість грошей в обігу може спричинити настання депресії, а також дефляції. Центральний банк справляє активний вплив на розвиток економіки шляхом застосування заходів монетарного регулювання. Проте рівень монетизації економіки України вдвічі нижчий, ніж в Угорщині та Румунії, у чотири рази менший, ніж у Чехії, а також у 8,5 рази порівняно з Польщею. Для прискореного розвитку країни слід перейти від фрагментарних (нерідко нав'язаних ззовні) реформ до державної політики, заснованої на врахуванні об'єктивних економічних законів, забезпеченості внутрішніми ресурсами, а також можливостях залучення капіталів на міжнародних фінансових ринках. Важливого значення набувають також питання запровадження заходів, спрямованих на активізацію внутрішніх інвестицій. У ході проведення грошово-кредитної політики ЦБ країни має забезпечити кількість грошей в обігу, яка підтримує макроекономічну динаміку. Коливання реального сукупного попиту зумовлюють необхідність змін реальної вартості грошей (за незмінної швидкості їх обігу), яка відображає відношення реального сукупного попиту до реальної вартості грошей. Швидкість обігу грошей визначає рівноважну ставку процента ЦБ, тобто ставку рефінансування. Змінюючи її, центральний банк порушує рівновагу грошового обігу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. GDP growth (annual %) / World Bank Group. URL: <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.KD.ZG?end=2018&locations=ua&start=2000>.
2. Дунаєв Б.Б., Любич О.О. Фінансове управління макроекономічними процесами. Фінанси України. 2018. № 9. С. 73 – 90.
3. Зведені національні рахунки за 2017 рік / Державна служба статистики України. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua>.
4. Magyar Nemzeti Bank. URL: <https://www.mnb.hu>.
5. Narodowy Bank Polski. URL: <https://www.nbp.pl>.
6. Banca Națională a României. URL: <http://www.bnro.ro>.
7. Česká národní banka. URL: <https://www.cnb.cz>.
8. Дробязко А. Особливості монетарної політики Польщі, Румунії, Угорщини, Чехії: інструменти та механізми впливу на економічне прискорення. Посилення значимості монетарної політики в країнах Центральної і Східної Європи у посткризовий період і рекомендації для України / наук. ред. В. Юрчишин. Київ : Заповіт, 2019. С. 83–95.
9. Global Goals for Sustainable Development / UN. URL: <http://www.un.org/sustainabledevelopment/>.
10. Дунаєв Б.Б. Благосостояние – труд, капитал и деньги: Основы теории воспроизводства. Киев: Интердрук, 2013. 231 с.
11. Сакс Д., Ларрен Ф. Макроэкономика. Глобальный подход. М.: Дело, 1999. 848 с.
12. Laffer A. Government exaction and revenue defficiencies/ Supply-side solution. Chatham, 1983. P. 122.
13. Canto V.A., Laffer A. B., Evans P., Miles M. A., Joines D. H., Welb R. Foundation of Supply-Side Economics: Theory and Evidence. Academic Press, 1983. 283 p.
14. Moore, Stephen. Think Twice About Gregory Mankiw, National Review (28 февраля 2003).

15. Дунаев Б.Б. Оптимизация ставки налога на доход производства. Кибернетика и системный анализ. 2019. № 3. С. 99–111.
16. Горбачук В.М. Про взаємозв'язок між реальною грошовою масою, бюджетним дефіцитом і рівнем оподаткування. Доповіді НАН України. Київ, 1999. С. 97–101.
17. Виконання державного бюджету України в 2019 р. Мінфін. 2019. 26 черв. URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/finance/budget/gov/2019/>.
18. Коляда Т. А. Формування бюджетної стратегії України: теорія, методологія, практика : [монографія]. Ірпінь

## REFERENCES

1. GDP growth (annual%) / World Bank Group. URL: <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.KD.ZG?end=2018&locations=ua&start=2000>.
2. Dunaev BB, Lyubich O.O. Financial management of macroeconomic processes. Finance Ukraine. 2018. No. 9. P. 73 - 90.
3. Established national rakhunki for 2017 rik / Derzhavna statistics service of Ukraine. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua>.
4. Magyar Nemzeti Bank. URL: <https://www.mnb.hu>.
5. Narodowy Bank Polski. URL: <https://www.nbp.pl>.
6. Banca Națională a României. URL: <http://www.bnro.ro>.
7. Česká národní banka. URL: <https://www.cnb.cz>.
8. Drobyazko A. Peculiarities of monetary policy of Poland, Rumunia, Ugorshchina, Czech Republic: Instruments and mechanics are more economically accelerated. Strengthening the significance of monetary policy in the Central and Scheme of Europe at the post-crisis period and recommendations for Ukraine / sciences. ed. V. Yurchishin. Kiev: Zapovit, 2019.P. 83–95.
9. Global Goals for Sustainable Development / UN. URL: <http://www.un.org/sustainabledevelopment/>.
10. Dunaev B. B. Wealth - labor, capital and money: Fundamentals of the theory of reproduction. Kiev: Interdruk, 2013.231 s.
11. Sachs D., Larren F. Macroeconomics. Global approach: M.: Delo, 1999.848 p.
12. Laffer A. Government exaction and revenue defficiencies / Supply-side solution. Chatham, 1983. P. 122.
13. Canto V.A., Laffer A. B., Evans P., Miles M. A., Joines D. H., Welb R. Foundation of Supply-Side Economics: Theory and Evidence. Academic Press, 1983. 283 p.
14. Moore, Stephen. Think Twice About Gregory Mankiw, National Review (February 28, 2003).
15. Dunaev B.B. Optimization of income tax rate. Cybernetics and systems analysis. 2019. No. 3. P. 99–111.
16. Gorbachuk V.M. About reciprocity's ties between real penny, budget deficit and recession. Dopovidi NAS of Ukraine. Kiev, 1999. S. 97–101.
17. Vikonannya of the sovereign budget of Ukraine in 2019 p. Мінфін. 2019.26 hearts URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/finance/budget/gov/2019/>.
18. Kolyada T. A. Formuvannaya budgetary strategy of Ukraine: theory, methodology, practice: [monograph]. Irpin.

*Стаття надійшла до редакції 22.10.2019.*

## ДИСКУСІЙНІ ПОВІДОМЛЕННЯ

УДК 004.942 ; 54 ; 087 ; 078

<https://orcid.org/0000-0001-8030-2866>
**М. М. БЕКЕТОВ**

### МАТЕМАТИЧНА ТА ПРОСТОРОВА МОДЕЛЬ ПЕРІОДИЧНОГО ЗАКОНУ ХІМІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

***Анотація.** На основі даних хімічних елементів виявлено закономірності Періодичного закону хімічних елементів та здійснено математичне моделювання з метою з'ясування відображення основоположних законів у Просторовій моделі Періодичного закону хімічних елементів, яку створив учень середньої школи Невзоров Бекетов Микита Сергійович. Оцінювання проводилось на основі порядкових атомних номерів елементів, відносних атомних мас елементів, розподілення електронів у атомах за енергетичними рівнями, співвідношення властивостей елементів та особливостей будови їхніх атомів. У Просторовій моделі, яку створив Невзоров Бекетов Микита Сергійович, всі відомі елементи об'єднані у нерозривний ланцюг за зростанням їхніх порядкових номерів. Ланцюг елементів скручено у спіраль так, щоб елементи утворювали вертикальні стовпці (групи) за спорідненням їхніх властивостей. Просторова модель підтверджує можливість знаходження нових елементів не лише наприкінці Періодичної таблиці, але і на початку – як і вважав Д.І. Менделєєв.*

***Ключові слова:** Математична модель, Просторова модель, Періодичний закон хімічних елементів, Періодична таблиця, Менделєєв, нерозривний ланцюг, скручено у спіраль, групи, властивості, атомні маси, періоди, енергетичні рівні, об'ємне бачення.*

DOI: 10.35350/2409-8876-2019-17-4-118-124

**Вступ**

Генеральна асамблея ООН проголосила 2019 рік «Міжнародним роком Періодичної таблиці хімічних елементів (ІУРТ2019)» [3]. На підставі рішення Генеральної асамблеї ООН (202 EX/43), Генеральна конференція ЮНЕСКО схвалила ініціативу святкування Міжнародного року Періодичної таблиці хімічних елементів в 2019 році (39 C/60) [4].

«Періодична таблиця елементів є одним з найбільш значних досягнень в науці. Це унікальний інструмент, який дозволяє вченому прогнозувати появу і властивості речовини на Землі і в решті частини Всесвіту. Періодична таблиця хімічних елементів – це більше, ніж просто керівництво або каталог усіх відомих атомів у всесвіті; це вікно у Всесвіт, що допомагає розширити наше розуміння оточуючого нас світу», – заявив Жан-Пол Нгома-Абіага, програмний фахівець, координатор заходів в рамках святкування Року в

ЮНЕСКО. «Ця ініціатива, поряд із заходами по всьому світу, підкреслить важливість Періодичної таблиці для науки, технологій та сталого розвитку людства» [5].

Організація Об'єднаних Націй з питань освіти, науки і культури (ЮНЕСКО) активно сприяє популяризації фундаментальних наук в інтересах сталого розвитку, в тому числі завдяки Міжнародній програмі ЮНЕСКО з фундаментальних наук (МПФН) [5].

Проведення Міжнародного року координується Міжнародною програмою ЮНЕСКО з фундаментальних наук (МПФН) і Міжнародним союзом теоретичної і прикладної хімії (МСТПХ) у співпраці з національними, регіональними та міжнародними хімічними товариствами і союзами [5].

Заходи святкування цієї видатної події відбувалися по всьому світові. У Законі України "Про загальну середню освіту", Державній національній програмі "Освіта" визначено напрями розвитку національної системи освіти, спрямовані на підвищення інтелектуального потенціалу нації та виховання творчої особистості [6]. У загальноосвітніх школах Луганської області протягом 2019 року проводились Дискусійні круглі столи «Хімічні таємниці Всесвіту» за участі талановитих учнів шкіл області на підтримку проголошеного Генеральною асамблеєю ООН Міжнародного року Періодичної таблиці хімічних елементів. Автор ідеї та модератор проведення Дискусійних круглих столів «Хімічні таємниці Всесвіту» Бекетова Ганна Миколаївна – учитель хімії Комунального закладу «Лисичанська спеціалізована школа I – III ступенів №8 Лисичанської міської ради Луганської області».

В рамках проведення Дискусійних круглих столів «Хімічні таємниці Всесвіту» на підтримку проголошеного Генеральною асамблеєю ООН Міжнародного року Періодичної таблиці хімічних елементів, представлено Просторову модель Періодичного закону хімічних елементів, яку створив учень середньої школи Невзоров Бекетов Микита Сергійович.



Рисунок 1 – Просторова модель Періодичного закону хімічних елементів, яку створив Невзоров Бекетов Микита Сергійович (зображений на фото)

## 1. Загальна характеристика Просторової моделі Періодичного закону хімічних елементів

У Просторовій моделі Періодичного закону хімічних елементів всі відомі елементи об'єднані у нерозривний ланцюг за зростанням їхніх порядкових номерів. Ланцюг елементів скручено у спіраль так, щоб елементи утворювали вертикальні стовпці (групи) за спорідненням їхніх властивостей. Спіраль розміщено на трьох «стовпах» (у формі циліндрів) різного діаметру за порядком заповнення електронами орбіталей s-, p-, d-, f-елементів та

спорідненням їхніх властивостей. Різні кольори елементів відображають заповнення електронами енергетичних рівнів та підрівнів (орбіталей) у атомах елементів.

У запропонованій Просторовій моделі Періодичного закону хімічних елементів, s-елементи і р-елементи головної підгрупи утворюють основну спіраль – «основний стовп». Другий стовп обертають d-елементи побічних підгруп – в єдиному ланцюгу елементів вони утворюють окремі кола, одне під одним. Такі ж кола в єдиному ланцюгу елементів утворюють і f-елементи на третьому стовпі Просторової моделі. У кожному оберті спіралі головної підгрупи «основного стовпа» вісім елементів (s-елементів та р-елементів) – вісім груп. «Основний стовп» має 7 обертів ланцюга елементів – сім періодів. За умов відкриття елементів наприкінці чи спочатку Періодичної таблиці – кількість обертів збільшиться. Елементи головної підгрупи утворюють безперервні вертикальні стовпці (групи) за спорідненням їхніх властивостей. У кожному оберті другого стовпа (d-елементів) – 10 елементів. На другому стовпі загалом чотири оберти ланцюга елементів – по одному оберту у періодах з четвертого по сьомий включно. У кожному оберті третього стовпа (f-елементів) – 14 елементів. На третьому стовпі два оберти – по одному оберту ланцюга елементів у шостому та сьомому періодах.

Безперервний ланцюг елементів, скручений у спіраль, дозволяє помістити інертні гази перед елементами першої групи, таке розміщення відповідає Періодичній таблиці за авторством самого Д.І. Менделєєва у редакції 1905 року [11].

## **2. Загальна постановка задачі, об'єкт, предмет та мета досліджень**

Метод математичного моделювання ґрунтується на застосуванні математичної моделі як засобу дослідження реальних об'єктів, процесів чи явищ. В зв'язку з тим, що математичний аналіз здійснює учень середньої школи Невзоров Бекетов Микита Сергійович – використовуються етапи, методи та засоби математичного моделювання в рамках загальної середньої освіти. В. О. Швець виділяє такі етапи розв'язування прикладної задачі у школі [7]: створення математичної моделі; дослідження математичної моделі та вирішення математичної задачі; інтерпретація отриманих результатів.

Об'єкт дослідження – Періодичний закон хімічних елементів. Періодичний закон – фундаментальний закон природи, який визначає властивості хімічних елементів, які перебувають у періодичній залежності від значень зарядів ядер атомів. Предмет дослідження – основні закономірності будови атомів елементів, порядок заповнення електронами енергетичних рівнів у атомах елементів, періодична залежність властивостей хімічних елементів від особливостей будови їхніх атомів.

Мета дослідження – з'ясування відображення основоположних законів у Просторовій моделі Періодичного закону хімічних елементів.

## **3. Методика і результати досліджень**

Менделєєв Дмитро Іванович 1869 року при зіставленні властивостей відомих на той час хімічних елементів та величин їхніх атомних мас сформулював Періодичний закон таким чином: властивості хімічних елементів, простих



речовин, а також склад і властивості сполук перебувають у періодичній залежності від значень атомних мас [2].

Існує кілька сотень варіантів зображення періодичної системи (аналітичні криві, таблиці, геометричні фігури і т. п.). За базу приймається форма Періодичної таблиці – довгий варіант з 18 групами, що затверджена Міжнародним союзом теоретичної і прикладної хімії (IUPAC) як основна.

Максимальна кількість електронів на енергетичних рівнях (N) розраховується на підставі головного квантового числа (n) [12] та дорівнює:

$$N = 2n^2 \quad (1)$$

на 1-му рівні  $N_1 = 2 \times 1^2 = 2$  електрони;  
на 2-му енергетичному рівні  $N_2 = 2 \times 2^2 = 8$  електронів;  
на 3-му енергетичному рівні  $N_3 = 2 \times 3^2 = 18$  електронів;  
на 4-му енергетичному рівні  $N_4 = 2 \times 4^2 = 32$  електронів.

Орбітальне квантове число (l) характеризує форму орбіталей та приймає значення від 0 до (n-1) [12]. Крім числових значень, орбітальне квантове число (l) має і літерне позначення:

для  $l_1 = 1 - 1 = 0$  позначення s;

для  $l_2 = 2 - 1 = 1$  позначення p;

для  $l_3 = 3 - 1 = 2$  позначення d;

для  $l_4 = 4 - 1 = 3$  позначення f.

Кількість орбіталей ( $e_o$ ) на підрівні (для s-, p-, d-, f-підрівня) розраховується за формулою:

$$e_o = 2l + 1 \quad (2)$$

для s-підрівня  $e_{o1} = 2 \times 0 + 1 = 1$  орбіталь;

для p-підрівня  $e_{o2} = 2 \times 1 + 1 = 3$  орбіталі;

для d-підрівня  $e_{o3} = 2 \times 2 + 1 = 5$  орбіталей;

для f-підрівня  $e_{o4} = 2 \times 3 + 1 = 7$  орбіталей.

Максимальна кількість електронів на підрівнях (на орбіталі максимальна кількість 2 електрони) [12] розраховується за формулою:

$$e = 2e_o \quad (3)$$

на s-орбіталі  $e_1 = 2 \times 1 = 2$  електрони;

на p-орбіталах  $e_2 = 2 \times 3 = 6$  електронів;

на d-орбіталах  $e_3 = 2 \times 5 = 10$  електронів;

на f-орбіталах  $e_4 = 2 \times 7 = 14$  електронів.

Аналіз Просторової моделі здійснюється за основними параметрами – загальна кількість елементів, загальна кількість груп, загальна кількість періодів, кількість елементів у одному оберті спіралі, відповідність розміщення елементу у Просторовій моделі властивостям, характерним для групи елементів у вертикальному стовпці (групі) елементів, кількість елементів у кожному оберті кожного стовпа.

Загальна кількість елементів у єдиному ланцюгу Просторової моделі за зростанням порядкових номерів відповідає загальній кількості відомих елементів. Загальна кількість груп елементів складає 8 груп головної

підгрупи «основного стовпа», 10 груп побічної підгрупи другого стовпа, 14 груп третього стовпа Просторової моделі. Загальна кількість періодів елементів складає сім періодів. Загальна кількість та структура розміщення елементів, груп та періодів у Просторовій моделі відповідає чинній редакції Періодичної таблиці, що затверджена Міжнародним союзом теоретичної і прикладної хімії (IUPAC).

Кількість елементів обороту спіралі основного «стовпа» ( $N_1$ ) головної підгрупи (суми s-елементів та р-елементів, починаючи з другого періоду), розрахована на основі орбітальних квантових чисел ( $l_1$ ), дорівнює:

$$N_{\text{осн.}} = 2 \times (2 \times l_1 + 1) + 2 \times (2 \times l_2 + 1) \quad (4)$$

$$N_{\text{осн.}} = 2 \times (2 \times 0 + 1) + 2 \times (2 \times 1 + 1) = 2 + 6 = 8 \text{ елементів.}$$

Кількість елементів обороту спіралі другого «стовпа» ( $N_2$ ) побічної підгрупи (d-елементів, починаючи з четвертого періоду), розрахована на основі орбітального квантового числа ( $l_3$ ), дорівнює:

$$N_{\text{друг.}} = 2 \times (2 \times l_3 + 1) \quad (5)$$

$$N_{\text{друг.}} = 2 \times (2 \times 2 + 1) = 2 \times 5 = 10 \text{ елементів.}$$

У кожному оберті другого стовпа (d-елементів) Просторової моделі – 10 елементів. На другому стовпі загалом чотири оберти ланцюга елементів – по одному оберту у періодах з четвертого по сьомий включно.

Кількість елементів обороту спіралі третього «стовпа» ( $N_3$ ) лантаноїдів і актиноїдів (f-елементів, починаючи з шостого періоду), розрахована на основі орбітального квантового числа ( $l_4$ ), дорівнює:

$$N_{\text{трет.}} = 2 \times (2 \times l_4 + 1) \quad (6)$$

$$N_{\text{трет.}} = 2 \times (2 \times 3 + 1) = 2 \times 7 = 14 \text{ елементів.}$$

На третьому стовпі Просторової моделі два оберти по 14 f-елементів – по одному оберту у шостому та сьомому періодах.

Таблиця 1 – Максимальна густина електронів на оболонках (рівнях)

Оболонки (рівні)	s-підрівень	p-підрівень	d-підрівень (заповнюються орбіталі попередньої оболонки)	f-підрівень (заповнюються орбіталі другої від краю оболонки)	Максимальна кількість електронів на рівні	Елементів у періоді
1	2	-	-	-	2	2
2	2	6	-	-	8	8
3	2	6	10	-	18	8
4	2	6	10	14	32	18
5	2	6	10	14	32	18
6	2	6	10	-	18	32
7	2	6	-	-	8	32
РАЗОМ					118	118

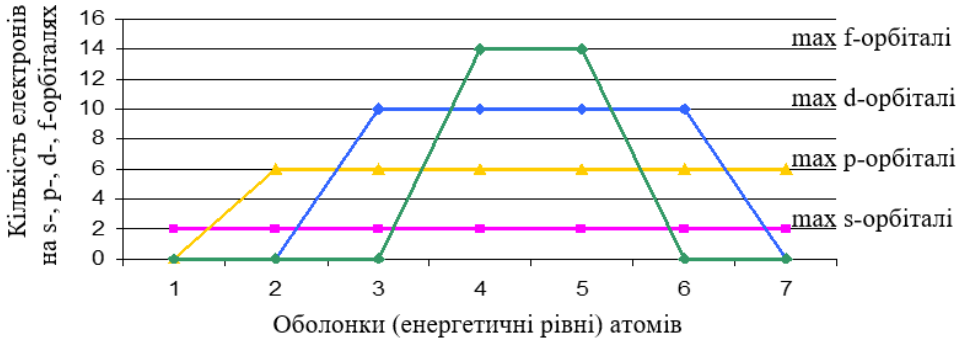


Рисунок 2 – Максимальна густина електронів на оболонках (рівнях)

Кількість та структура розміщення s-, p-, d-, f-елементів у Просторовій моделі відповідає основоположним законам, включає та поєднує у складі єдиного ланцюга елементів лантаноїди і актиноїди, зносу на які зроблено у чинній Періодичній таблиці. Це дає підстави стверджувати, що у Просторовій моделі Періодичного закону хімічних елементів, яку створив Невзоров Бекетов Микита Сергійович, більш повно відображені основоположні закони, структура та особливості будови атомів елементів.

#### 4. Висновки

В результаті проведених досліджень з'ясувалося найбільш повне відображення основоположних законів та структури та особливостей будови атомів елементів у Просторовій моделі Періодичного закону хімічних елементів, яку створив Невзоров Бекетов Микита Сергійович. Математична та Просторова модель підтверджують можливість знаходження нових елементів не лише наприкінці Періодичної таблиці, але і на початку – як і вважав Д.І. Менделєєв. Результати досліджень можуть застосовуватись у освітній, науковій та дослідницькій діяльності. Просторова модель Періодичного закону хімічних елементів, яку створив Невзоров Бекетов Микита Сергійович, формує математичне об'ємне бачення періодичної залежності властивостей хімічних елементів від особливостей будови їхніх атомів, дає розуміння поступового ускладнення будови атомів елементів за зростанням їх порядкових номерів, дає можливість прогнозувати особливості та властивості нових елементів, розвиває структурне та просторове мислення.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Енциклопедія кібернетики: у 2 т. / за ред. В. М. Глушкова. – Київ: Гол. ред. Української радянської енциклопедії, 1973.
2. Менделєєв Д. И. Основы химии. Том 2. – М.: Госхимиздат, 1947. – 389 с.
3. The International Year of the Periodic Table URL: <https://iypt2019.org>
4. Official launch event of the International Year of the Periodic Table of Chemical Elements URL: <https://en.unesco.org/events/official-launch-event-international-year-periodic-table-chemical-elements>

5. 2019 is proclaimed the International Year of the Periodic Table of Chemical Elements URL: <https://en.unesco.org/news/2019-proclaimed-international-year-periodic-table-chemical-elements>
6. Закон України "Про загальну середню освіту" // Освіта. – 1997. – С. 6–11.
7. Швець, В.О. Математичне моделювання як змістова лінія шкільного курсу математики / В.О. Швець // Дидактика математики : проблеми і дослідження : міжнародний збірник наукових робіт. – Донецьк : Вид-во ДонНУ, 2009. – № 32. – С. 16–23.
8. Кирилюк, Л.Л. Використання математичного моделювання при розв'язуванні задач у курсі алгебри основної школи / Л.Л.Кирилюк // Вересень. – 2009. – № 3–4 (48-49). – С. 72–78.
9. Панченко, Л.В. Система прикладних задач як засіб формування вмінь математичного моделювання у майбутніх вчителів математики / Л.В. Панченко // Математика в школі. – 2004. – № 9–10. – С. 21–28.
10. Д. И. Менделеев «Периодический закон». Редакция, статья и примечания Б.М. Кедрова. Издательство Академии Наук СССР, Москва, 1958. С. 470–517.
11. Менделеев Д. И. Попытка химического понимания мирового эфира. СПб., 1905.
12. Глосарій термінів з хімії // Й. Опейда, О. Швайка. Ін-т фізико-органічної хімії та вуглехімії ім. Л.М. Литвиненка НАН України, Донецький національний університет – Донецьк: «Вебер», 2008. – 758 с.

## REFERENCES

1. The Encyclopaedia of Cybernetics: in 2 volumes / Ed. V. M. Glushkova. – Kiev: Ch. ed. Ukrainian Soviet Encyclopaedia, 1973.
2. Mendeleev D. I. Fundamentals of chemistry. Volume 2. – M.: Goskhimizdat, 1947. – 389 p.
3. The International Year of the Periodic Table URL: <https://iypt2019.org>
4. Official launch event of the International Year of the Periodic Table of Chemical Elements URL: <https://en.unesco.org/events/official-launch-event-international-year-periodic-table-chemical-elements>
5. 2019 is proclaimed the International Year of the Periodic Table of Chemical Elements URL: <https://en.unesco.org/news/2019-proclaimed-international-year-periodic-table-chemical-elements>
6. The law of Ukraine "On General Secondary Education" // Education. – 1997. – S. 6–11.
7. Shvets, V.A. Mathematical modeling as the content line of the school course in mathematics / V.A. Shvets // Didactics of mathematics: problems and research: international collection of scientific papers. – Donetsk: Publishing house of DonNU, 2009. – No. 32. – S. 16–23.
8. Kirilyuk, L.L. The use of mathematical modeling in solving problems in the course of algebra of the basic school / L.L. Kiriluk // Veresen. – 2009. – No. 3–4 (48-49). – S. 72–78.
9. Panchenko, L.V. The system of applied problems as a means of forming the skills of mathematical modeling in future teachers of mathematics / L.V. Panchenko // Mathematics in school. – 2004. – No. 9–10. – S. 21–28.
10. D. I. Mendeleev "Periodic Law". Editorial, article and notes B.M. Kedrov. Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, Moscow, 1958. p. 470–517.
11. Mendeleev D. I. An attempt at a chemical understanding of the world ether. SPb., 1905.
12. Glossary of terms in chemistry // J. Opeida, O. Schweika. Institute of physico-organic chemistry and coal chemistry named after L.M. Litvinenko, National Academy of Sciences of Ukraine, Donetsk National University – Donetsk: Weber, 2008. – 758 p.

*Стаття надійшла до редакції 25.10.2019.*

РЕФЕРАТИ / ABSTRACTS

**ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЕКОНОМІЦІ**  
**INFORMATION TECHNOLOGY IN ECONOMY**

---

УДК 621.391

**Метод підготовки первинної інформації для адаптивних безпроводових засобів передачі даних** / Горлинський Б.В., Зайцев С.В. // Математичне моделювання в економіці. – 2019. – № 4. – С. 5–15.

Запропоновано метод підготовки первинної інформації для адаптивних безпроводових засобів передачі даних для забезпечення заданих показників достовірності інформації та підвищення їх ефективності.

UDC 621.391

**Method of preparing primary information for adaptive wireless data transmission device** / Horlynskyi B.V., Zaitsev S.V. // Mathematical modeling in economy. – 2019. – № 4. – P. 5–15.

The method of preparation of primary information for adaptive wireless data transmission is proposed to provide the specified indicators of reliability of information and increase their efficiency.

---

УДК 004.93:004.02

**Ситуаційно-подійна модель гібридного розпізнавання образів для обробки неоднорідних даних в складних системах** / Захожай О.І. // Математичне моделювання в економіці. – 2019. – № 4. – С. 16–25.

Достовірність та швидкість прийняття рішень має велике значення для будь-яких прикладних сфер людської діяльності. Якість отриманого рішення однаково важлива для технічних, економічних або геополітичних процесів. При цьому, досить часто об'єкт, що підлягає аналізу, представляє собою складну систему, в якій для отримання рішення недостатньо апіорної інформації, а більшість процесів має стохастичний характер. Для таких випадків використовується гібридне розпізнавання, при якому об'єкт представляється сукупністю образів, ознаки яких мають різну природу походження. Для отримання достовірного і оперативного рішення при гібридному розпізнаванні в статті представлена нова ситуаційно-подійна модель, яка дозволяє забезпечити у будь-який момент часу отримання достовірного рішення на основі аналізу меншої кількості, але найбільш інформативних ознак. В якості прояву ситуації в моделі використовується поточний рівень перешкод і викривлень, за яким визначаються рівні інформативності ознак об'єкта інформатизації.

UDC 004.93:004.02

**Situational-event model of the hybrid patterns recognition for heterogeneous data processing in complex systems** / Zakhzhay O.I. // Mathematical modeling in economy. – 2019. – № 4. – P. 16–25.

The reliability and decision-making speed have a great importance for any applied spheres of human activity. Quality of the received decision it is equally important for technical, economic, geopolitical and others processes. At the same time, quite often an object that is subject the analysis, represents a complex system in which for obtaining the decision of insufficiently prior information, and the majority of processes has stochastic character. For such cases it is used hybrid recognition at which an object is represented by set of patterns which signs have the different nature of origin. In the article, for obtaining the authentic and operational decision at hybrid recognition proposed the new situational-event model which allows to provide reliable decision-making on the basis of the analysis of smaller quantity but the most informative signs at any moment of system`s life circle. As manifestation of a situation in model used the current level of interference and distortions that determined the level of signs informativity for informatization object.

---

## МАТЕМАТИЧНІ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ МОДЕЛІ В ЕКОНОМІЦІ MATHEMATICAL AND INFORMATIONAL MODELS IN ECONOMY

---

УДК 651.4.9 : 004

**Індикатори та індекси рівня розвитку освіти** / Тихонов Ю.Л., Полумієнко С.К. // Математичне моделювання в економіці. – 2019. – № 4. – С. 26–40.

На основі аналізу систем індикаторів міжнародних організацій, окремих країн, рейтингів ВНЗ України виявлено сучасні тенденції розвитку системи базисних індикаторів. Зокрема, розглядалися індикатори, які використовують організації PISA, ПРООН, “Комісія Стігліца”, “Комісія Всесвітньої організації охорони здоров'я” країн Канада, Корея, NZ, Японія. Аналізувалися національні рейтинги ВНЗ “Освіта.ua”, “Топ-200 Україна”, “Бал ЗНО на контракт” тощо. В результаті проведених досліджень встановлено, що питання оцінки ефективності функціонування закладів освіти як системного організаційно-економічного механізму слабо висвітлені і практично не розроблені. Необхідно створювати інструментарій, який включає засоби оцінки рівня електронної освіти, ефективного створення складових електронної освіти. Наукова новизна отриманих результатів полягає в аналізі можливостей використання індикаторів для електронної освіти. Практична значимість отриманих результатів визначається можливістю їх застосування при вирішенні задач визначення оптимальних інвестицій в освіту по регіонах країни.

UDC 651.4.9 : 004

**Indicators and indices of the level of education development** / Tikhonov Y.L., Polumienko S.K. // *Mathematical modeling in economy*. – 2019. – No. 4. – P. 26–40.

Based on the analysis of the system of indicators of international organizations, individual countries, higher education institutions of Ukraine, current trends in the development of the basic indicators system are revealed.

In particular, the indicators used by PISA, UNDP, Commission Stiglitz, the Commission of the World Health Organization of Canada, Korea, NZ, Japan were considered. The national ratings of the higher educational institutions "Osvita.ua", "Top 200 Ukraine", "ZNO for the contract", etc. were analyzed.

As a result of the conducted researches, it was established that the issues of evaluating the effectiveness of the functioning of educational institutions as a systemic organizational and economic mechanism are poorly elucidated and practically not developed. It is necessary to create a toolkit that includes tools for assessing the level of electronic education, the effective creation of components of e-education. The scientific novelty of the results obtained is to analyze the possibilities of using indicators for e-learning. The practical

significance of the results obtained is determined by the possibility of their application in solving the problems of determining the optimal investment in education by country's regions.

---

УДК 330.161 : 330.3 : 316.334.2

**Природно-ресурсний потенціал сталого розвитку України як нелінійна динамічна система** / Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. // Математичне моделювання в економіці. – 2019. – № 4. – С. 41–49.

Доведено, що у системі природно-ресурсного потенціалу сталого розвитку України комплементарно сполучуються стійкість і змінність як вбудовані механізми її розвитку в статичі та динаміці, забезпечення її самоорганізації і самовідновлення, кількісної і якісної трансформації. У статичі превалюють характеристики стійкості та тяжіння до стабільності і сталості. У динаміці основною характеристикою є змінність системи, відтворення стабільності, що детермінує (реагує) на процеси трансформації і розвитку її складових підсистем, потенційних можливостей (зміни ендогенного середовища), інститутів і інституцій, обмежувачів і стабілізаторів (зміни екзогенного середовища). Показано, що динамічний розвиток моделі відтворення економічних інтересів характеризується якісними змінами як у її структурі, механізмах, формах (ендогенному середовищі), так і якісними трансформаціями в екзогенному просторі.

UDC 330.161 : 330.3 : 316.334.2

**Natural resource potential of Ukraine sustainable development as an nonlinear dynamic system** / Azarov S.I., Sydorenko V.L., Zadunaj O.S. // Mathematical modeling in economy. – 2019. – № 4. – С. 41–49.

The article justifies the main characteristics of the system of sustainable development. It is proved that in this system stability and variability are complementarily combined as integrated mechanisms of its development in statics and dynamics, assurance of its self-organization and self-restoration, quantitative and qualitative transformation. In its static state, there prevail characteristics of steadiness and leaning towards stability and constancy. In the dynamic state, the main characteristic is variability of the system, which determines (reacts) to the processes of transformation and development of its constituent subsystems, potential opportunities (changes in the endogenous environment), institutions and establishments, constraints and stabilizers (changes in the exogenous environment). It is shown that the dynamic development of the model of reproduction of economic interests is characterized by qualitative changes in its structure, mechanisms, forms (endogenous environment), and qualitative transformations in exogenous space.

---

УДК 621.372.542

**Математичні методи рентгенівської комп'ютерної томографії** / Тулякова Н.О., Трофимчук О.М. // Математичне моделювання в економіці. – 2019. – № 4. – С. 50–66.

Рентгенівська комп'ютерна томографія – грандіозний за своєю значимістю винахід, який поєднує знаменне в історії науки відкриття рентгенівського випромінювання, праці геніального математика Й. Радона та сучасні науково-технічні досягнення в галузі фізики, електроніки та комп'ютерної техніки. Метою статті є створення теоретичних засад для науково-технічних досліджень та розробок у актуальному напрямі комп'ютерного покращення якості рентгенівських томографічних зображень та їх автоматизованого аналізу. У статті викладені математичні основи рентгенівської комп'ютерної томографії, що ґрунтуються на інтегральних перетвореннях Радона. Проведено огляд методів відновлення двовимірного томографічного зображення поперечного перерізу тривимірного об'єкту за проекціями. Стаття має теоретичний

характер і може бути корисною математикам, фізикам, інженерам, програмістам та спеціалістам інших галузей.

UDC 621.372.542

**Mathematical Methods of X-ray Computed Tomography** / Tulyakova N., Trofymchuk O. // *Mathematical modeling in economy.* – 2019. – № 4. – P. 50–66.

X-ray computed tomography is a prominent invention that combines a historical x-ray discovery, the works of genial mathematician J. Radon and modern scientific and technological achievements in physics, electronics and computer technology. The article provides the theoretical background for scientific research and development in computer improvement of the quality of x-ray tomographic images and their automated analysis, which is in demand now. The article presents the mathematical foundations of x-ray computed tomography based on Radon integral transformations. The reconstruction methods for a 2D tomographic image of a transverse slice of a 3D object from projections are overviewed. The article is theoretical and can be useful for mathematicians, physicists, engineers, programmers and specialists in other fields.

---

## АНАЛІЗ, ОЦІНКА ТА ПРОГНОЗУВАННЯ В ЕКОНОМІЦІ ANALYSIS, EVALUATION AND FORECASTING IN ECONOMY

---

УДК 004. 81

**Модель ситуації у функціональній системі когнітивного поля** / Ляшенко І.О., Стефанцев С.С., Шемаєв В.М. // *Математичне моделювання в економіці.* – 2019. – № 4. – С. 67–74.

У статті запропоновано модель ситуації у функціональній системі когнітивного поля. В моделі для визначення лінгвістичних значень ознаки ситуації використовуються її відносні значення. Структуризація лінгвістичних значень полягає в упорядкуванні елементів отриманої множини лінгвістичних значень і ґрунтується на методі опорних точок і методі поділу відрізка. Запропоновано метод шкалювання ознак ситуації. Наведені приклади шкалювання ознак ситуації.

UDC 004.81

**Situational model in a functional system of cognitive field** / Liashenko I.A., Stefantsev S.S., Shemaiev V.M. // *Mathematical modeling in economy.* – 2019. – № 4. – P. 67–74.

The article proposes a model of the situation in the functional system of the cognitive field. The model uses relative values to determine the linguistic value of a sign of a situation. The structuring of linguistic values consists in ordering the elements of the resulting set of linguistic values and is based on the method of anchor points and the method of segment separation. The method of scaling of signs of a situation is offered. Examples of scaling the situation are given.

УДК 004.942

**Підхід до прогнозування на основі даних моніторингу за допомогою комбінованого ситуаційно-індуктивного моделювання (основна ідея та очікувані результати)** / Стефанишин Д.В. // *Математичне моделювання в економіці.* – 2019. – № 4. – С. 75–87.

Цей підхід пропонується використовувати для прогнозування поведінки складних природних, техногенних, екологічних та економічних систем на основі регулярних моніторингових даних, що формують часові ряди, за допомогою спрощених моделей



регресійного типу. У підході використовується ідея декомпозиції складних завдань моделювання та прогнозування за допомогою регресійних моделей на основі даних моніторингу для подолання надмірної структурної та параметричної невизначеності реальних динамічних систем. Відповідно до запропонованого підходу, прогнозування на основі даних моніторингу за допомогою комбінованого ситуаційно-індуктивного моделювання складається зі встановлення відповідних ситуаційних моделей регресійного типу, адекватних у майбутньому протягом певних обмежених часових інтервалів.

UDC 004.942

**An approach to predicting based on monitoring data by means of combined situational-inductive modeling (the main idea and expected results)** / Stefanyshyn D.V. // *Mathematical modeling in economy*. – 2019. – № 4. – P. 75–87.

This approach is proposed to use to predict the behavior of complicated technogenous, ecological and economic systems, based on regular monitoring data forming time series, by means of simplified models of regression type. The approach uses the idea of decomposition of complex modeling and prediction tasks by means of regression models based on monitoring data to overcome the excessive structural and parametric uncertainty of the real dynamic systems. According to the approach proposed, the prediction based on monitoring data by means of combined situational-inductive modeling consists of establishing relevant situational models of regression type being adequate in the future within certain limited time intervals.

---

УДК 004.942 ; 519.85

**Оцінка стану та визначення показників ризику ІТ компаній при злиттях та поглинаннях** / Татарченко Є.С., Лифар В.О. // *Математичне моделювання в економіці*. – 2019. – № 4. – С. 88–98.

Сучасний діловий клімат характеризується безперервним ростом конкуренції, зміщенням прибутку та швидкозмінними технологіями. Умови росту фінансових прибутків можуть забезпечити процеси злиття та поглинання (M&A). Одним з важливих елементів злиття та поглинання є якісна оцінка вартості та стану компанії, що є ІТ. Розробка проектів інформаційних технологій вимагає особливого проектно-керованого підходу до всіх стадій життєвого циклу проекту. Водночас такі проекти відносяться до найбільш ризикованих інвестицій. Умови росту конкурентоздатності можуть забезпечити засоби аналізу поточних станів компаній та система підтримки прийняття рішень відносно стану та управління ІТ проектами. Така технологія може бути пріоритетом, заснованим на методах і моделях оцінки ризику розробок.

UDC 004.942 ; 519.85

**Assessment of the status and determination of risk indicators of IT companies in mergers and acquisitions** / Tatarchenko E.S., Lyfar V.O. // *Mathematical modeling in economy*. – 2019. – № 1. – P. 88–98.

The article deals with the problem of developing models, methods and information technology to support decision-making in analyzing the current state of IT companies in order to achieve the most favorable operating conditions. Today's business climate is characterized by continuous growth in competition, shifting profits and rapidly changing technologies. Conditions for the growth of financial earnings can be provided by M&A. One important element of a merger and acquisition is a qualitative assessment of the value and status of the IT company. Information technology project development requires a specific project-driven approach to all stages of the project life cycle. At the same time, such projects are among the most risky investments. Conditions for increasing competitiveness can be provided by means of analyzing the current state of companies and a system for supporting decision-making regarding the state and management of IT

projects. Such technology may be a priority based on development risk assessment methods and models.

---

УДК 330.101.541-336.7

**Моделювання монетарного регулювання відтворення економіки** / Дробязко А.А., Дунаєв Б.Б., Любич А.А. // Математичне моделювання в економіці. – 2019. – № 4. – С. 99–117.

Постійне зростання реального валового внутрішнього продукту можна забезпечити за допомогою розширеного відтворення капіталу і пропорційного зростання кількості грошей в обігу при інфляційному саморегулюванні ринкової рівноваги і ставкою податків в економіці не вище оптимальної. Рівновага економіки країни, тобто зростання реального ВВП, забезпечується регулюванням ЦБ рівноваги на ринку грошей і державним регулюванням розширеного відтворення використовуваного в сфері виробництва капіталу при саморегулюванні рівноваги на ринку благ за рівнем цін.

UDC 330.101.541-336.7

**Modeling of monetary regulation of reproduction of economy** / Drobyazko A.A., Dunaev B.B., Lyubich A.A. // Mathematical modeling in economy. – 2019. – № 1. – P. 99–117.

The constant growth of real gross domestic product can be ensured through expanded reproduction of capital and a proportional increase in the amount of money in circulation with inflationary self-regulation of market equilibrium and the tax rate in the economy not higher than optimal. The equilibrium of the country's economy, that is, the growth of real GDP, is ensured by the regulation of the equilibrium by the Central Bank of the money market and the state regulation of the expanded reproduction of capital used in the production of capital while self-regulation of equilibrium in the market of goods at the price level.

---

## ДИСКУСІЙНІ ПОВІДОМЛЕННЯ DISCUSSION'S

---

УДК 004.942 ; 54 ; 087 ; 078

**Математична та Просторова модель Періодичного закону хімічних елементів** / Бекетов М.М. // Математичне моделювання в економіці. – 2019. – № 4. – С. 118–124.

На основі даних хімічних елементів виявлено закономірності Періодичного закону хімічних елементів та здійснено математичне моделювання з метою з'ясування відображення основоположних законів у Просторовій моделі Періодичного закону хімічних елементів, яку створив учень середньої школи Невзоров Бекетов М. С. Дослідження ґрунтувалося на аналізі порядкових атомних номерів та відносних атомних мас елементів, кількості груп, кількості періодів, розподілення електронів у атомах за енергетичними рівнями, співвідношення властивостей елементів та будови атомів. У Просторовій моделі всі відомі елементи об'єднані у нерозривний ланцюг за зростанням їхніх порядкових номерів. Ланцюг елементів скручено у спіраль так, щоб елементи утворювали вертикальні стовпці (групи) за спорідненням їхніх властивостей. Математична та Просторова модель підтверджують можливість знаходження нових елементів не лише наприкінці Періодичної таблиці, але і на початку – як і вважав Д.І. Менделєєв.

UDC 004.942 ; 54 ; 087 ; 078

**Mathematical and Spatial Model of the Periodic Law of Chemical Elements /**

Beketov M.M. // *Mathematical modeling in economy.* – 2019. – № 1. – P. 118–124.

Based on the data of chemical elements, the regularities of the Periodic law of chemical elements are revealed and mathematical modeling is carried out to confirm the reflection of the basic laws in the Spatial Model of the Periodic law of chemical elements created by schoolchildren N. S. Nevzorov Beketov. The study was based on the analysis of atomic numbers and the relative atomic masses of elements, the number of groups, the number of periods, the distribution of electrons in atoms over energy levels, the dependence of the properties of elements on the structure of atoms. In the Spatial Model all known elements are combined into an inextricable chain in ascending order of serial numbers. The chain of elements is twisted into a spiral so that the elements form vertical columns (groups) by kinship of properties. The Mathematical and Spatial Model confirm the possibility of finding new elements not only at the end of the Periodic table, but also at the beginning – as D.I. Mendeleev claimed.

---

## ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Азаров Сергій Іванович** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник Інституту ядерних досліджень НАН України (Україна, м. Київ).

**Бекетов Микола Михайлович** – вчитель, Голова Громадського організаційного комітету заходів на підтримку проголошеного Генеральною асамблеєю ООН Міжнародного року Періодичної таблиці хімічних елементів ІУРТ 2019 (Україна, м. Сєверодонецьк).

**Горлинський Борис Вікторович** – начальник управління Департаменту захисту інформації Адміністрації Державної служби спеціального зв'язку та захисту інформації України (Україна, м. Київ).

**Дробязко Анатолій Олександрович** – кандидат економічних наук, провідний науковий співробітник ДННУ «Академія фінансового управління» (Україна, м. Київ).

**Дунаєв Борис Борисович** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник ДННУ «Академія фінансового управління» (Україна, м. Київ).

**Задунай Олексій Сергійович** – кандидат технічних наук, начальник центру Державного науково-дослідного інституту спеціального зв'язку та захисту інформації (Україна, м. Київ).

**Зайцев Сергій Васильович** – професор кафедри інформаційних та комп'ютерних систем Чернігівського національного технологічного університету (Україна, м. Чернігів).

**Захожай Олег Ігорович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмування та математики Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Україна, м. Сєверодонецьк).

**Azarov Serhiy** – Doctor of Technical Sciences, Senior Research Associate, Leading Researcher Institute for Nuclear Research NAS of Ukraine (Ukraine, Kyiv).

**Beketov Mykola** – Chairman of the Public Organizing Committee of events in support of the International Year of the Periodic Table of Chemical Elements (IYPT 2019) proclaimed by the UN General Assembly, teacher (Ukraine, Severodonetsk).

**Horlynskyi Borys** – Head of Office of Department of Information Protection of Administration of State Service of Special Communication and Information Protection of Ukraine (Ukraine, Kyiv).

**Drobiazko Anatolii** – PhD in Economics, Leading Researcher of the SESE «Academy of Financial Management» (Ukraine, Kyiv).

**Dunaev Boris** – PhD, senior researcher at the State educational, SESE «Academy of Financial Management» (Ukraine, Kyiv).

**Zadunaj Oleksiy** – PhD (Technical Science), Head of center of State Research Institute for Special Telecommunication and Information Protection (Ukraine, Kyiv).

**Zaitsev Sergei** – Professor of the Department of Information and Computer Systems Chernihiv National University of Technology (Ukraine, Chernihiv).

**Zakhozhay Oleh** – PhD (Engineering), Associate Professor of the programming and mathematics chair in Volodymyr Dahl East Ukrainian National University (Ukraine, Severodonetsk).

**Лифар Володимир Олексійович** – доктор технічних наук, завідуючий кафедрою програмування та математики Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Україна, м. Сєвєродонецьк).

**Ляшенко Ігор Олександрович** – кандидат військових наук, доцент кафедри військової підготовки ДВНЗ "Київський національний економічний університет імені Вадима Гетьмана" (КНЕУ) (Україна, м. Київ).

**Любич Олександр Олексійович** – доктор економічних наук, професор, заслужений економіст України, віце-президент ДННУ «Академія фінансового управління» (Україна, м. Київ).

**Полумієнко Сергій Костянтинович** – доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу прикладної інформатики Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України (Україна, м. Київ).

**Сидоренко Володимир Леонідович** – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри профілактики пожеж та безпеки життєдіяльності населення Інституту державного управління у сфері цивільного захисту (Україна, м. Київ).

**Стефанишин Дмитро Володимирович** – доктор технічних наук, провідний науковий співробітник Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору (ІТГП) НАН України, професор кафедри гідротехнічного будівництва та гідравліки Національного університету водного господарства та природокористування (НУВГП) (Україна, м. Рівне).

**Стефанцев Сергій Сергійович** – доцент кафедри військової підготовки ДВНЗ "Київський національний економічний університет імені Вадима Гетьмана" (КНЕУ) (Україна, м. Київ).

**Татарченко Єгор Сергійович** – аспірант Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Україна, м. Сєвєродонецьк).

**Lyfar Volodymyr** – Doctor of sciences (Engineering), Head of the department of programming and mathematics, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University (Ukraine, Severodonetsk).

**Liashenko Ihor** – PhD in military sciences, Associate Professor, department of military preparation, Kyiv National Economics University named after Vadym Hetman (Ukraine, Kyiv).

**Liubich Oleksander** – Doctor of Economics, Professor, Honored economist of Ukraine, vice-president, SESE «Academy of Financial Management» (Ukraine, Kyiv).

**Polumiienko Sergii** – Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Head of the Department of Applied Informatics, Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine (Ukraine, Kyiv).

**Sydorenko Volodymyr** – PhD (Technical Science), Associate Professor, Professor of the Department of Prevention of Fires and Safety of Vital Activities of the Population Institute of State Management in the Sphere of Civil Defence (Ukraine, Kyiv).

**Stefanyshyn Dmytro** – Doctor of sciences (Eng.), Department of natural resources, Lead researcher, The Institute of Telecommunications and Global Information Space of the NAS of Ukraine, Associate Professor, professor, Department of hydro construction and hydraulics, The National University of Water and Environmental Engineering (Ukraine, Rivne).

**Stefantsev Serhii** – Associate Professor, department of military preparation, Kyiv National Economics University named after Vadym Hetman (Ukraine, Kyiv).

**Tatarchenko Yehor** – Postgraduate student, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University (Ukraine, Severodonetsk).

**Тихонов Юрій Леонгійович** – кандидат технічних наук, доцент, кафедри ІТС, "Луганський національний університет імені Тараса Шевченка" (Україна, м. Старобільськ).

**Трофимчук Олександр Миколайович** – доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НАН України, директор Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України (Україна, м. Київ).

**Тулякова Наталія Олегівна** – кандидат технічних наук, науковий співробітник Інституту прикладної фізики НАН України (Україна, м. Суми).

**Шемаєв Володимир Миколайович** – доктор військових наук, професор, головний науковий співробітник відділу воєнної та воєнно-економічної політики Національного інституту стратегічних досліджень (НІСД) (Україна, м. Київ).

**Tihonov Uriy** – PhD, Associate Professor, department of ITS, Taras Shevchenko "Lugansk National University" (Ukraine, Starobilsk).

**Trofymchuk Oleksandr** – Doctor of sciences (Eng.), Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Director of the Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine (Ukraine, Kyiv).

**Tulyakova Nataliya** – PhD in Technical Science, research assistant, Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine (Ukraine, Sumy).

**Shemaiev Volodymyr** – Doctor of military sciences, professor, Chief Scientist (Military and Economic Department) The National Institute for Strategic Studies (Ukraine, Kyiv).

© Авторські і суміжні права належать авторам окремих публікацій, Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Інституту економіки і прогнозування НАН України.

© Авторские и смежные права принадлежат авторам отдельных публикаций, Институту телекоммуникаций и глобального информационного пространства НАН Украины, Институту кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины, Институту экономики и прогнозирования НАН Украины.

Copying © authors of publications, Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine, Glushkov Institute of Cybernetics of NAS of Ukraine, Institute for Economics and Forecasting of NAS of Ukraine. All rights reserved.

## ДО УВАГИ АВТОРІВ ЖУРНАЛУ

Зміст матеріалів, що направляються до редакції, повинен відповідати профілю та науково-технічному рівню журналу. Тематика журналу стосується математичного моделювання у всіх сферах господарської діяльності, тобто, економіки в її широкому розумінні. До друку приймаються статті українською, англійською та російською мовами.

Кожна наукова стаття повинна мати вступ, розділи основної частини та висновки, а також анотацію і ключові слова двома мовами (українською та англійською). Також двома мовами подаються реферати до статті, які будуть розміщені в електронному варіанті журналу «Математичне моделювання в економіці» на сайті журналу. Вимоги до оформлення наведені на сайті журналу.

Усі представлені в редакцію рукописи проходять ретельне багатоланкове рецензування відповідними фахівцями за профілем статті. Якщо сумарна оцінка рецензентів менша за встановлений поріг, рукописи відхиляються. Автору надсилається відповідне повідомлення. Матеріали, отримані від автора, редакцією не повертаються. Після доопрацювання автор може подати матеріал повторно, з виконанням усіх процедур подачі матеріалу.

Статті, що були представлені в редакцію і прийняті після рецензування, але не попали в поточний номер журналу, будуть надруковані в наступних номерах журналу.

Зміст статті та якість написання або перекладу (українською або англійською мовами) переглядаються коректорами журналу, проте відповідальність за зміст та якість статті несуть автори матеріалу. До статті можуть бути внесені зміни редакційного характеру без згоди автора.

Розділ журналу, до якого буде віднесена стаття, визначається редакцією, узгоджується – головним редактором або його заступником.

Остаточний висновок щодо публікації матеріалів схвалює редакційна колегія журналу.

Електронна версія журналу, правила оформлення та вимоги до статей, зміни і доповнення до тематичних розділів будуть оперативно подаватися в Інтернеті на сайті журналу «Математичне моделювання в економіці» [www.mmjournal.in.ua](http://www.mmjournal.in.ua)

Журнал також представлений на сайті Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України <http://itgip.org/> у розділі «Видавнича діяльність».

## АДРЕСА РЕДАКЦІЇ

03186, м. Київ, Чоколівський бульв., 13,  
Інститут телекомунікацій і глобального  
інформаційного простору НАН України  
Телефони: (044) 245-87-97

(044) 524-22-62  
e-mail: journal.mme@gmail.com

Електронна версія журналу в Інтернеті  
[www.mmejournal.in.ua](http://www.mmejournal.in.ua) українською та  
англійською мовами

**ISSN (print) 2409-8876**

**ISSN (on-line) 2663-9068**

*Коректор – Берчун В. П.*

---

### **Надруковано:**

Видавничий дім «Юстон»  
01034, м. Київ, вул. О. Гончара, 36.  
Тел.: (044) 360-22-66  
Реєстраційне свідоцтво НБ № 153324 від 05.11.2012 р.

---

Підписано і здано до друку 26.12.2019. Формат 70X108/16. Папір офсетний.  
Офсетний друк. Умовн. друк. арк. 11.6  
Обл.-вид. арк. 12.8      Тираж 300 примірників      Замовлення №       

---

КИЇВ 2019