

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

# **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ЕКОНОМІЦІ**

№ 1 (18), січень-березень 2020 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 напрямками 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 2020**

## 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

*Виконавчий редактор* – **О.О. Кряжич**, канд. техн. наук

### Члени редколегії:

**К.А. Андрющенко**, д-р екон. наук

**В.М. Геєць**, 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. Любич**, 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 № 3 від 04.03.2020 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

**Горбулін В.П., Полумієнко С.К., Трофимчук О.М.**

Щодо ефективних стратегій національного та регіонального збалансованого розвитку..... 5

**Триснюк В.М., Сметанін К.В., Триснюк Т.В., Курило А.В.**

Удосконалення системи екологічного моніторингу сміттєзвалищ із застосуванням дистанційно пілотованих літальних апаратів..... 19

### МАТЕМАТИЧНІ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ МОДЕЛІ В ЕКОНОМІЦІ

**Литвиненко Я.В., Лупенко С.А., Ониськів П.А., Триснюк В.М., Зозуля А.М.**

Програмний комплекс для автоматизованого аналізу серцевого ритму на основі векторного ритмокардіосигналу..... 27

**Ратов Д.В., Лифар В.О.**

Визначення коефіцієнта щільності прилягання при математичному моделюванні робочого зачеплення просторових передач..... 39

**Кряжич О.О., Коваленко О.В.**

Релевантність інформації у часі при здійсненні пошукового запиту..... 50

**Васянін В.О., Заяць Ю.В., Ушакова Л.П.**

Моделювання розподілу вантажопотоків на автотранспортній мережі міжнародних перевезень..... 60

### АНАЛІЗ, ОЦІНКА ТА ПРОГНОЗУВАННЯ В ЕКОНОМІЦІ

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

Удосконалення методики комплексної оцінки сталого розвитку регіонів України..... 74

**Стефанишин Д.В.**

Про моделювання та кількісне оцінювання соціального ризику планованої діяльності, пов'язаної з підприємством деревообробної промисловості в с. Городок, Рівненської області..... 85

### ДИСКУСІЙНІ ПОВІДОМЛЕННЯ

**Бекетов М.М.**

Математична модель властивостей інертних газів та нових елементів на початку Періодичної таблиці..... 100

**РЕФЕРАТИ..... 110**

**ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ..... 116**

## CONTENTS

### INFORMATION TECHNOLOGY IN ECONOMY

**Horbulin V.P., Polumiienko S.K., Trofymchuk O.M.**  
On effective national and regional balanced development strategies..... 5

**Trysnyuk V.M., Smetanin K.V., Trysnyuk T.V., Kurilo A.V.**  
Improvement of the system of ecological monitoring of garbage dumps  
using remote piloted aircraft..... 19

### MATHEMATICAL AND INFORMATIONAL MODELS IN ECONOMY

**Litvinenko Y.V., Lupenko S.A., Onis'kiv P.A., Trisnyuk V.M.,  
Zozulya A.M.**  
Software for automated analysis of heart rhythm based on vector  
rhythmocardiogram..... 27

**Ratov D.V., Lyfar V.O.**  
Determination of density fit in the mathematical modeling of spatial  
working meshing gears..... 39

**Kryazhych O.O., Kovalenko O.V.**  
Relevance of information in time when performing a search query..... 50

**Vasyanin V.A., Zaiats Y.V., Ushakova L.P.**  
Modeling distribution of cargo flows in the international road transport  
network..... 60

### ANALYSIS, EVALUATION AND FORECASTING IN ECONOMY

**Azarov S.I., Sydorenko V.L., Zadunaj O.S.**  
Improving the methodology of a comprehensive assessment of sustainable  
development of the regions of Ukraine..... 74

**Stefanyshyn D.V.**  
On modeling and quantitative assessment of social risk of planned activity  
related to the woodworking enterprise in the Gorodok village, Rivne  
region..... 85

### DISCUSSION'S

**Beketov M.M.**  
A mathematical model of the properties of inert gases and new elements at  
the beginning of the Periodic Table..... 100

**ABSTRACTS**..... 110

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**..... 116

# ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЕКОНОМІЦІ

УДК 621.37-39

<https://orcid.org/0000-0002-7195-8684>

<https://orcid.org/0000-0001-9891-5417>

<https://orcid.org/0000-0003-3358-6274>

**В.П. ГОРБУЛІН, С.К. ПОЛУМІЄНКО, О.М. ТРОФИМЧУК**

## **ЩОДО ЕФЕКТИВНИХ СТРАТЕГІЙ НАЦІОНАЛЬНОГО ТА РЕГІОНАЛЬНОГО ЗБАЛАНСОВАНОГО РОЗВИТКУ**

***Анотація.** В статті розглядається побудова систем індикаторів та індексів сталого та збалансованого розвитку та теоретико-ігрового моделювання відповідних стратегій. Робиться висновок щодо складності їх знаходження. Пропонується ресурсний підхід до визначення індикаторів по різних сферах життєдіяльності суспільства, включаючи їх кількісні та якісні оцінки, а також уніфікований індекс для оцінки стану цих сфер та відповідних стратегій розвитку. На цій основі будується індекс збалансованого регіонального та національного розвитку.*

***Ключові слова:** збалансований та сталий розвиток, індикативний аналіз, теоретико-ігрова модель, уніфікований індекс розвитку.*

**DOI: 10.35350/2409-8876-2020-18-1-5-18**

### **Вступ**

Останнім часом з'явилося багато публікацій, планів, дорожніх карт, спрямованих на національний розвиток, які стосуються не тільки економічних, а й інших аспектів життєдіяльності суспільства, націлених на його сталий розвиток. За даними ООН [1] кількість робіт з проблематики сталого розвитку давно перевищила сто п'ятдесят тисяч. Незважаючи на те, що такі роботи істотно різняться – є суто науковими дослідженнями або прикладними чи методологічними розробками, вони іноді виглядають не більше, ніж декларації, які не містять конструктивних дій з вирішення проблеми розвитку на користь людини та суспільства.

Звісно, розібратися в усіх цих матеріалах та визначити певні напрямки створення національної стратегії розвитку, в тому числі сталого, теж можливо не завжди. Саме це стало підґрунтям цієї роботи, мета якої – запропонувати власний підхід до проблеми розвитку країни, який, ґрунтуючись на ключових підходах до її аналізу, має дати конструктивний та об'єктивний погляд на те, що утворює основу стратегії розвитку з точок зору ефективності її реалізації та одержаних результатів.

© В.П. Горбулін, С.К. Полумієнко, О.М. Трофимчук, 2020

## 1. Вихідні положення

Будемо розглядати розвиток як результат дій (стратегій) учасників певної системи, внаслідок яких відбувається її перехід від одного кількісного та якісного стану до іншого, вищого за прийнятими оцінками. Такою системою може бути як суспільство в цілому, його складові, бізнесові та інші структури, так і окрема людина, що є учасником системи, який реалізує власний та сукупний розвиток, виходячи з індивідуальних або групових цілей.

Для досягнення ефективності розвитку, одержання максимальних доходів при мінімумі витрат різнобічних ресурсів та часу сьогодні прикладається багато зусиль, використовуються різноманітні засоби та спеціально створені технології, насамперед інформаційні. Як ресурси при цьому визначається практично все, що може бути використане для досягнення поставлених цілей. Їх реалізація полягає, таким чином, у створенні нових ресурсів за рахунок використання наявних. В [2] для аналізу стану та напрямків розвитку соціо-еколого-економічної системи визначені категорії, види та сукупність базових індикаторів природних, економічних, соціальних, інфраструктурних, інформаційних, науково-технологічних та урядових ресурсів.

Наприкінці минулого століття визначення розвитку одержало нову концепцію – «сталий розвиток», яка була прийнята багатьма країнами, поширена не тільки в наукових, а й прикладних дослідженнях, спрямованих на проблеми та завдання життєдіяльності людства. За формулюванням ООН сталий розвиток визначався як «розвиток, який задовольняє потреби нинішнього покоління без шкоди для можливості майбутніх поколінь задовольняти свої власні потреби» [3]. Її концепція була прийнята в 1992 р., хоча слід додати, що, зокрема, в Німеччині корені сталості розвитку доходять до середини минулого століття [4].

Насправді, красива, спрямована на майбутні інтереси та потреби, ідея. Але, на жаль, на наш погляд, тільки ідея, хоча й прийнята як певна рекомендація, навіть керівництво з подальшого розвитку, багатьма країнами, в тому числі й Україною [5], організаціями, суспільними групами тощо. Насправді, сталий розвиток в зробленому визначенні суперечить поточним тенденціям економічної діяльності, взагалі життєдіяльності суспільства, існуючим засадам її ефективності, концепції необмеженого зростання, про що зазначалося ще в [6] та багатьох інших публікаціях. Все це призвело й до переходу ООН від вихідного визначення сталого розвитку до затвердження його наступних цілей, прийнятих у вересні 2015 р. на Саміті ООН зі сталого розвитку.

### 17 Цілей сталого розвитку ООН

- |   |   |
|---|---|
| 1. Подолання бідності                                 | 9. Промисловість, інновації та інфраструктура |
| 2. Подолання голоду, розвиток сільського господарства | 10. Скорочення нерівності                     |
| 3. Міцне здоров'я і благополуччя                      | 11. Сталий розвиток міст і громад             |
| 4. Якісна освіта                                      | 12. Відповідальне споживання та виробництво   |
| 5. Гендерна рівність                                  | 13. Пом'якшення наслідків зміни клімату       |

- |  |   |
|--|---|
| 6. Чиста вода та належні санітарні умови | 14. Збереження морських ресурсів            |
| 7. Доступна та чиста енергія             | 15. Захист та відновлення екосистем суші    |
| 8. Гідна праця та економічне зростання   | 16. Мир, справедливість та сильні інститути |
|  | 17. Партнерство заради сталого розвитку     |

Ці цілі, як бачимо, іноді «не дуже відповідають» початковому визначенню сталості розвитку, що ще раз підкреслює неможливість його повноцінної реалізації.

Але, ще з самого початку досліджень проблематики сталого розвитку, який став масово вживаним поняттям, робились спроби визначення й іншого – збалансованого розвитку. Спільна збалансованість та сталість розвитку визначалась ЄС ще наприкінці минулого століття [7]. Також визначалось, що збалансованість розвитку є складнішим поняттям, яке знаходиться на дискусійній стадії, зокрема, в Ірландії [8]. Не менш важливим є визначення його двох основних складових, по-перше, що є збалансованим станом всієї соціо-еколого-економічної системи, по-друге, стратегіями з його досягнення та забезпечення, включаючи стратегії переведення системи з вихідного незбалансованого стану в збалансований. Саме ці завдання визначають основи підходу, що пропонується в цій роботі.

В [9] баланс розвитку визначається як поліпшення сфери послуг, економіки, навколишнього середовища та демократичних і соціальних норм та цінностей, яким має надаватися рівнозначна вага. В [10–11] та багатьох інших публікаціях розглядається питання балансу між процесами розвитку та консервацією поточного стану, насамперед, природи з урахуванням історії розвитку регіону та його майбутнього [12]. В [13] збалансованість розвитку розглядається з точки зору діяльності регіональної або національної інноваційної та підприємницької екосистеми в умовах невизначеності її оточення та зводиться до багатокритеріальної задачі пошуку нелінійної динамічної стабільності у відкритій системі через обмін інформацією. Для цього пропонуються теоретико-ігрові методи аналізу ризику вкладення в інвестиційні проекти, що відповідають інноваціям. Але це – звуження вихідної проблеми до економічної.

В [14] пропонується індекс збалансованого розвитку, який базується на чотирьох субіндексах: зовнішнього та внутрішнього економічного оточення, соціальних очікувань та поточної соціальної ситуації. Ці субіндекси ґрунтуються на 45 індикаторах, які відображають соціально-економічні фактори розвитку, як і сам сукупний індекс збалансованого розвитку. При цьому індекс не відображає стану розвитку навколишнього середовища та пошуку стратегій збалансованого розвитку. Аналізується кореляція субіндексів, що не стосується їх компромісних аспектів.

Визначення збалансованості розвитку в [15] ґрунтується на кооперативній політиці, яка включає громадсько-державне управління, спрямоване на спеціалізований по регіонах країни розвиток. Базовим принципом є використання специфічних сильних сторін та ресурсів регіонів замість застосування однакової для них стратегії. Це потребує аналізу поточного стану справ в регіоні, на основі якого формується стратегія

збалансованого розвитку, яка застосовується для 4 районів Сеулу. Стратегія передбачає створення 80000 робочих місць, які базуються на наявних ресурсах цих районів. Це має оживити економіку шляхом створення туристичних об'єктів, що викликатимуть інтерес до регіонів через їх природні та історичні ресурси та мають змінити бідне середовище шляхом створення «зеленого» простору, культури та інфраструктури життя.

Подібні стратегії збалансованого використання та створення ресурсів формально визначаються в [2] та інших роботах авторів, де будується модель збалансованого розвитку. Збалансованість розвитку трактується як результат виконання оптимальних коаліційних стратегій, які визначаються вектором Шеплі [16], що дає оптимальний поділ вигравів коаліцій та відображає максимальний, узгоджений всіма коаліціями результат використання та створення нових ресурсів, спрямований на задоволення інтересів учасників системи.

Але на практиці знайдені на основі вектора Шеплі оптимальні стратегії та відповідний ним стан ресурсів можуть не відповідати збалансованому розвитку, оскільки побудована модель не враховує реального змісту стратегій, вони навіть можуть визначати збалансоване руйнування системи внаслідок превалювання деструктивних стратегій. Стратегії розвитку залежать також від специфічного для кожного з регіонів переліку та стану ресурсів, який, навіть для України, дуже різниться вже тільки за природними ресурсами, що робить порівняльні оцінки збалансованості використання ресурсів взагалі непридатними, як і однакові для різних регіонів стратегії розвитку. Крім цього, важливим є вихідний стан системи, в якому ці стратегії планується застосовувати. Він теж має бути збалансованим, оскільки збалансовані стратегії частково відтворюватимуть вихідний стан, надаючи шляхи його збалансованої зміни.

В моделі [2] коаліції входять в гру з певним обсягом природних, соціальних, економічних та інших ресурсів та мають одержати частку створених всіма учасниками, насамперед, економічних ресурсів, яка відповідає обсягу наданих коаліцією всім учасникам ресурсів та поділу згідно з вектором Шеплі. Але цей поділ не враховує безповоротну витрату ресурсів, що має місце, наприклад, при видобутку корисних копалин та врахуванні всіх його наслідків, серед яких, крім економічної вигоди та суспільної корисності, присутні й ушкодження навколишнього середовища, здоров'я населення, яке до того ж в майбутньому не зможе працювати в цій сфері внаслідок поступового знищення копалин.

На практиці все виглядає ще гірше – такий поділ здебільшого не виконується, природі, як ключовому учаснику моделі, загалом не повертається її частка у відповідності з обсягом витрачених ресурсів та їх суспільною корисністю. Ця частка лише опосередковано присутня у наданих товарах, послугах та у доходах інших коаліцій. Але ринкова оцінка цих ресурсів, яка використовується зараз, неповноцінно відображає їх зменшення та потенційний дефіцит, що стосуватиметься всіх гравців в майбутньому.

В результаті більш близькою до проблеми збалансованості розвитку моделлю стає не кооперативна або коаліційна гра, в межах яких узгоджуються інтереси та стратегії всіх учасників, а гра на виживання та подібні до неї, де про баланс інтересів говорити не доводиться.



Таким чином, знайдені за допомогою кооперативної моделі [2] стратегії збалансованого розвитку втрачають корисність та й сенс, як і застосування цієї та багатьох інших моделей. До цього слід додати, що для виведення регіону на певний збалансований стан використання та створення ресурсів мають застосовуватися незбалансовані стратегії, які не відповідають моделям кооперативної поведінки. Також у моделі [2] відсутній опис збалансованого цільового стану розвитку, який треба визначити по окремих регіонах країни з урахуванням специфіки їх життєдіяльності, ресурсів, норм, традицій та ін. З точки зору реалізації модель, по-перше, потребує значного обсягу даних вже при формуванні коаліцій та їх стратегій з використання та створення ресурсів, по-друге, є достатньо складною для визначення одержаних рішень, які по суті не дають повноцінних стратегій збалансованого розвитку.

В підсумку, зазначене навряд чи забезпечить ефективне застосування запропонованої в [2] та інших кооперативних моделей на практиці. Зважаючи на це, далі пропонується інший, певним чином простіший та більш універсальний спосіб визначення стану розвитку регіональних та національної соціо-еколого-економічних систем та стратегій їх розвитку, спрямованих на досягнення збалансованого стану.

## 2. Формування стратегій розвитку

Будемо позначати наявні в регіоні країни  $n$  в момент часу  $t \in [t_0, T]$  ресурси через  $res_{n,l,k}(t)$  та виділяти категорії  $l$  і види  $k$  природних, економічних, соціальних, інфраструктурних, інформаційних, оборонно-військових, науково-технологічних та урядових ресурсів (див. [17] та табл. 1, 3). Для їх опису запропоновано більше 450 базових індикаторів (індекс для індикаторів опускається).

Таблиця 1 – Категорії, види та індикатори ресурсів

Категорії	Види	Індикатори	Величина
Природні ресурси	Земельні ресурси	Ліси і інші лісовкриті площі	$res_{n,l,k}(t)$
		Заповідні землі, заказники, парки, сади тощо	... ..
		Непридатні для використання в сільському господарстві землі, можливі для лісорозведення	... ..
		Площа територій, покритих поверхневими водами	... ..
		Сільськогосподарські угіддя	... ..
		Забудовані землі	... ..
... ..	... ..	... ..	... ..

Визначимо порівняльні частки ресурсів

$$r_{n,l,k}(t) = res_{n,l,k}(t) / \sum_n res_{n,l,k}(t)$$

в їх національному обсязі, маючи на увазі, що ці величини можуть розглядатися як частка світового обсягу  $\mathbf{n,l,k}$ -ресурсу (тоді для її позначення потрібен додатковий індекс). Ці порівняльні оцінки, вочевидь, слід вважати найбільш об'єктивними кількісними характеристиками обсягів наявних ресурсів.

Для визначення подальших оцінок на основі  $\mathbf{r}_{\mathbf{n,l,k}}(\mathbf{t})$  враховуватимемо наступні фактори:

- легкість сприйняття методів оцінювання непідготовленими особами, що вимагається й ООН та іншими міжнародними організаціями;
- використання об'єктивної, мінімальної за обсягом інформації;
- універсальність методів оцінювання для різних сфер життєдіяльності суспільства, що загалом відсутнє в багатьох індексах та системах індикаторів;
- формування стратегій розвитку регіональних та національної соціо-еколого-економічних систем, включаючи забезпечення збалансованості стану регіонів та шляхів їх розвитку.

Введемо наступні величини

$$r_{l,k}^{min}(t_j) = \min_n r_{n,l,k}(t_j), \quad r_{l,k}^{max}(t_j) = \max_n r_{n,l,k}(t_j),$$

які вказують мінімальне та максимальне по всіх регіонах  $\mathbf{n}$ ,  $\mathbf{n}=1, \dots, \mathbf{N}$ , значення порівняльних оцінок  $\mathbf{r}_{\mathbf{n,l,k}}(\mathbf{t}_j)$  ресурсу виду  $\mathbf{k}$  категорії  $\mathbf{l}$  в момент часу  $\mathbf{t}_j \in [\mathbf{t}_0, \mathbf{T}]$ .

Величина

$$rm_{l,k}(t_j) = r_{l,k}^{max}(t_j) - r_{l,k}^{min}(t_j),$$

тоді вказує максимальний розкид значень  $\mathbf{r}_{\mathbf{n,l,k}}(\mathbf{t}_j)$ , а величина

$$rr_{n,l,k}(t_j) = r_{n,l,k}(t_j) - r_{l,k}^{min}(t_j), \quad -$$

співвідношення обсягу ресурсу  $\mathbf{r}_{\mathbf{n,l,k}}(\mathbf{t}_j)$  та його мінімальної величини в момент часу  $\mathbf{t}_j$  по регіонах  $\mathbf{n}$ .

Співвідношення

$$pr_{n,l,k}(t_j) = \frac{rr_{n,l,k}(t_j)}{rm_{l,k}(t_j)} = \frac{r_{n,l,k}(t_j) - r_{l,k}^{min}(t_j)}{r_{l,k}^{max}(t_j) - r_{l,k}^{min}(t_j)}, \quad (1)$$

вказує порівняльне значення обсягу ресурсу виду  $\mathbf{k}$  категорії  $\mathbf{l}$ , нормоване за розкидом значень  $\mathbf{r}_{\mathbf{n,l,k}}(\mathbf{t}_j)$  в момент  $\mathbf{t}_j$  по регіонах  $\mathbf{n}$ . Підхід до такого визначення різнобічних оцінок використовується в окремих індексах рівня розвитку соціо-еколого-економічних систем.

Співвідношення (1) не враховує позитивність та негативність ресурсів. Будемо надалі зіставляти (1) позитивним ресурсам, а негативним, наприклад твердим побутовим відходам, величину

$$dr_{n,l,k}(t_j) = 1 - \frac{r_{n,l,k}(t_j) - r_{l,k}^{min}(t_j)}{r_{l,k}^{max}(t_j) - r_{l,k}^{min}(t_j)} = \frac{r_{l,k}^{max}(t_j) - r_{n,l,k}(t_j)}{r_{l,k}^{max}(t_j) - r_{l,k}^{min}(t_j)}$$

Тоді наступна різниця виражає оцінку стану ресурсу

$$rc_{n,l,k}(t_j) = pr_{n,l,k}(t_j) - dr_{n,l,k}(t_j), \tag{2}$$

де  $pr_{n,l,k}(t_j)$  та  $dr_{n,l,k}(t_j)$  відображають позитивність ( $dr_{n,l,k}(t_j)=0$ ) та негативність ( $pr_{n,l,k}(t_j)=0$ )  $n,l,k$ -ресурсу в момент часу  $t_j$ , а величина

$$rpd_{n,l,k}(t_{j+1})=rc_{n,l,k}(t_{j+1})-rc_{n,l,k}(t_j) \tag{3}$$

порівняльну оцінку зміни  $n,l,k$ -ресурсу в момент  $t_{j+1}$  внаслідок діяльності всіх учасників системи.

Крім кількісних оцінок, розглядатимемо якісні оцінки, які відображають властивості ресурсів, характеристики доступу та тиску на них, потенціалу їх використання та відновлення тощо. Введемо сукупність узагальнених якісних оцінок, яку будемо використовувати одночасно для всіх видів ресурсів (табл. 2). Таке узагальнення пов'язано, перш за все, з великою кількістю оцінок по кожному з видів ресурсів по різних сферах життєдіяльності суспільства, яка частково розглядалася, зокрема, в [2].

Таблиця 2 – Узагальнені якісні оцінки

Характеристики та властивості виду ресурсів		Поточні тенденції використання та стан ресурсу	Очікуваний стан при поточних тенденціях – збільшення/ зменшення (%%)
1		2	3
1	Наявність, якість та доступність	$Q_{n,l,k,1}$	$QV_{n,l,k,1}$
2	Тиск, необхідність для внутрішніх та зовнішніх учасників, регіонів, країн	$Q_{n,l,k,2}$	$QV_{n,l,k,2}$
3	Вплив на інші ресурси, регіони та країни	$Q_{n,l,k,3}$	$QV_{n,l,k,3}$
4	Інтенсивність використання	$Q_{n,l,k,4}$	$QV_{n,l,k,4}$
5	Розробка та застосування новітніх технологій	$Q_{n,l,k,5}$	$QV_{n,l,k,5}$
6	Безпека, вразливість до пошкодження, шкідливість використання	$Q_{n,l,k,6}$	$QV_{n,l,k,6}$
7	Відновлення та розвиток, їх потенціал, в тому числі як самостійний	$Q_{n,l,k,7}$	$QV_{n,l,k,7}$
8	Сприйняття поточного стану суспільством	$Q_{n,l,k,8}$	$QV_{n,l,k,8}$

Продовження таблиці 2

1		2	3
9	Ставлення в суспільстві до інших учасників, колективних ресурсів	$q_{n,l,k,9}$	$qv_{n,l,k,9}$
10	Протидія суспільства суперечним інтересам учасників, регіонів, країн	$q_{n,l,k,10}$	$qv_{n,l,k,10}$
11	Відповідність світовому рівню, роль на міжнародному ринку	$q_{n,l,k,11}$	$qv_{n,l,k,11}$
12	Ефективність заходів з поліпшення поточних тенденцій	$q_{n,l,k,12}$	$qv_{n,l,k,12}$
Підсумкова оцінка		$q_{n,l,k} = \sum_{i=1}^{12} q_{n,l,k,i}$ $q_{n,l,k,i} = 1, 2, \dots, 10.$	$qv_{n,l,k} = \sum_{i=1}^{12} qv_{n,l,k,i}$
		$qav_{n,l,k} = (q_{n,l,k} + qv_{n,l,k}/100)/2.$	

Для визначення оцінок необхідно зіставити змістовну характеристику видів ресурсів із запропонованими в табл. 2 узагальненими оцінками, що вимагатиме, на наш погляд, незначних зусиль з сукупної інтерпретації властивостей та специфіки видів ресурсів та відповідної якісної оцінки. Наприклад, перша з оцінок табл. 2 «Наявність,..», при характеристиці виду ресурсів «Здоров'я» категорії «Соціальні ресурси», відобразатиме наявність мережі оздоровчих закладів, доступ до лікувальних закладів, вартість лікування, наявність кваліфікованих лікарів та ін.

Якісні оцінки  $q_{n,l,k}$  (в табл. 2 вказані з індексами оцінок) будемо відносити до всіх видів  $n,l,k$ -ресурсів. При їх визначенні будемо виходити зі стану ресурсів, шляхів їх використання, очікуваного стану при поточних тенденціях та ін.

Для визначення  $q_{n,l,k}$  може використовуватися, наприклад, шкала якісних оцінок від 1 (найменша, відсутня) до 10 (найбільша), які відображають стан та існуючі тенденції використання ресурсів. Оцінка очікуваного стану ресурсу  $qv_{n,l,k}$  в табл. 2 є відсотковим зменшенням або збільшенням  $q_{n,l,k}$ .

Крім кількісних та якісних оцінок, розглядатимемо (табл. 3) вагові коефіцієнти  $w_{n,l}$  категорій та  $u_{n,l,k}$  видів ресурсів  $r_{n,l,k}(t)$ .

Таблиця 3 – Вагові коефіцієнти та якісні оцінки категорій та видів ресурсів

Категорії	Види	Вагові коефіцієнти (види)	Якісні оцінки	Вагові коефіцієнти (категорії)
1	2	3	4	5
Природні ресурси	Земельні ресурси	$u_{n,1,1}$	$qav_{n,1,1}$	$w_{n,1}$
	Корисні копалини	$u_{n,1,2}$	$qav_{n,1,2}$	
	Водні ресурси	$u_{n,1,3}$	$qav_{n,1,3}$	

Продовження таблиці 3

1	2	3	4	5
	Атмосфера	$u_{n,1,4}$	$qav_{n,1,4}$	$w_{n,1}$
	Лісові ресурси	$u_{n,1,5}$	$qav_{n,1,5}$	
	Тваринний та рослинний світ	$u_{n,1,6}$	$qav_{n,1,6}$	
	Відходи та небезпечні хімічні речовини	$u_{n,1,7}$	$qav_{n,1,7}$	
	Фінансування заходів з реновації	$u_{n,1,8}$	$qav_{n,1,8}$	
Соціальні ресурси	Населення	$u_{n,2,1}$	$qav_{n,2,1}$	$w_{n,2}$
	Здоров'я	$u_{n,2,2}$	$qav_{n,2,2}$	
	Матеріальне забезпечення	$u_{n,2,3}$	$qav_{n,2,3}$	
	Житлове забезпечення	$u_{n,2,4}$	$qav_{n,2,4}$	
	Освіта	$u_{n,2,8}$	$qav_{n,2,8}$	
	Безпека	$u_{n,2,6}$	$qav_{n,2,6}$	
	Соціальна інфраструктура	$u_{n,2,7}$	$qav_{n,2,7}$	
	Громадянська активність	$u_{n,2,8}$	$qav_{n,2,8}$	
Економічні ресурси	Сільське, лісове та рибне господарство	$u_{n,3,1}$	$qav_{n,3,1}$	$w_{n,3}$
	Добувна промисловість та розроблення кар'єрів	$u_{n,3,2}$	$qav_{n,3,2}$	
	Переробна промисловість	$u_{n,3,3}$	$qav_{n,3,3}$	
	Постачання електроенергії, газу, пари та кондиційованого повітря	$u_{n,3,4}$	$qav_{n,3,4}$	
	Водопостачання, каналізація, поводження з відходами	$u_{n,3,5}$	$qav_{n,3,5}$	
	Будівництво	$u_{n,3,6}$	$qav_{n,3,6}$	
	Оптова та роздрібна торгівля, ремонт автотранспортних засобів і мотоциклів	$u_{n,3,7}$	$qav_{n,3,7}$	

Продовження таблиці 3

1	2	3	4	5
	Транспорт, складське господарство, поштова та кур'єрська діяльність	$u_{n,3,8}$	$qav_{n,3,8}$	$w_{n,3}$
	Тимчасове розміщення й організація харчування	$u_{n,3,9}$	$qav_{n,3,9}$	
	Інформація та телекомунікації	$u_{n,3,10}$	$qav_{n,3,10}$	
	Фінансова та страхова діяльність	$u_{n,3,11}$	$qav_{n,3,11}$	
	Операції з нерухомим майном	$u_{n,3,12}$	$qav_{n,3,12}$	
	Професійна, наукова та технічна діяльність	$u_{n,3,13}$	$qav_{n,3,13}$	
	Діяльність у сфері адміністративного та допоміжного обслуговування	$u_{n,3,14}$	$qav_{n,3,14}$	
	Державне управління й оборона, обов'язкове соціальне страхування	$u_{n,3,15}$	$qav_{n,3,15}$	
	Освіта	$u_{n,3,16}$	$qav_{n,3,16}$	
	Охорона здоров'я та надання соціальної допомоги	$u_{n,3,17}$	$qav_{n,3,17}$	
	Мистецтво, спорт, розваги та відпочинок	$u_{n,3,18}$	$qav_{n,3,18}$	
	Надання інших видів послуг	$u_{n,3,19}$	$qav_{n,3,19}$	
	Діяльність домашніх господарств	$u_{n,3,20}$	$qav_{n,3,20}$	
	Діяльність екстериторіальних організацій і органів	$u_{n,3,21}$	$qav_{n,3,21}$	

Продовження таблиці 3

1	2	3	4	5
Інфраструктура	Інфраструктурні об'єкти	$u_{n,4,1}$	$qav_{n,4,1}$	$w_{n,4}$
	Критичні об'єкти, об'єкти-заручники	$u_{n,4,2}$	$qav_{n,4,2}$	
Інформаційні ресурси	Рівень розвитку	$u_{n,5,1}$	$qav_{n,5,1}$	$w_{n,5}$
	Рівень ризиків	$u_{n,5,2}$	$qav_{n,5,2}$	
	Інформаційний тиск	$u_{n,5,3}$	$qav_{n,5,3}$	
	Інформаційна війна	$u_{n,5,4}$	$qav_{n,5,4}$	
Оборонно-військові ресурси	Оборонно-військові підприємства	$u_{n,6,1}$	$qav_{n,6,1}$	$w_{n,6}$
	Військові частини та об'єкти	$u_{n,6,2}$	$qav_{n,6,2}$	
Науково-технологічні ресурси <sup>1</sup>		$u_{n,7,1}$	$qav_{n,7,1}$	$w_{n,7}$
Урядові регіональні ресурси	Структура та діяльність	$u_{n,8,1}$	$qav_{n,8,1}$	$w_{n,8}$
	Бюджетні кошти	$u_{n,8,2}$	$qav_{n,8,2}$	

Для вагових коефіцієнтів  $w_{n,l}$  та  $u_{n,l,k}$  виконується –

$$\sum_k u_{n,l,k} = 1, 0 \leq u_{n,l,k} \leq 1, \sum_{l=1}^L w_{n,l}(t_j) = 1, 0 \leq w_{n,l}(t_j) \leq 1 .$$

В момент  $t_j$  маємо побудовані на основі (1)–(3) оцінки  $n,l,k$ -ресурсу з урахуванням вагових коефіцієнтів та якісних оцінок -

$$rpk_{n,l,k}(t_j) = rc_{n,l,k}(t_j) * u_{n,l,k}(t_j) * qav_{n,l,k}(t_j), qav_{n,l,k}(t_j) = \sum_{i=1}^{k(l)} qav_{n,l,ki}(t_j) .(4)$$

На основі (4) та вагових коефіцієнтів  $w_{n,l}$  для категорій  $l$  регіону  $n$  можемо сформувати зважені оцінки –

$$RDI_n(t_j) = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^{K(l)} rpk_{n,l,k}(t_j) * w_{n,l}(t_j) , \quad (5)$$

$K(l)$  та  $L$  – відповідно кількість видів та категорій ресурсів регіону  $n$ .

Тим самим,  $RDI_n$  утворює підсумкову оцінку стану регіональних ресурсів.

Будемо називати величину  $RDI_n$  індексом регіонального розвитку.

Зміна стану ресурсів може бути відображена сумою вигляду (5) по величинах (3), або величиною зміни індексу –

<sup>1</sup> Науково-технологічні ресурси додатково розподіляються по галузях досліджень.

$$RCI_n(t_{j+1})=RDI_n(t_{j+1})-RDI_n(t_j) .$$

З використанням оцінок ресурсів  $r_{n,l,k}(t)$ , їх вагових коефіцієнтів  $w_{n,l}$ ,  $u_{n,l,k}$  та індексів  $RDI_n(t_j)$  та  $RCI_n(t_j)$  можна відобразити, таким чином, найбільш важливі для регіону категорії та види ресурсів та їх зміну, тобто через  $RCI_n(t_j)$  та його складові визначити певний бажаний або цільовий стан, до якого треба спрямувати всю регіональну систему або її елементи, визначивши стратегії її учасників. Це дозволяє визначити  $RCI_n(t_{j+1})$  як індекс збалансованості розвитку регіону на проміжку  $[t_j, t_{j+1}]$  відрізка часу  $[t_0, T]$ , де під збалансованістю розуміється досягнення цільового (заздалегідь узгодженого) результату в інтересах всіх учасників системи, який полягатиме в досягненні певного значення  $RCI_n(t_j)$  та його складових оцінок. Ці ж оцінки вказуватимуть слабкі місця, які потребують найбільшої уваги в процесі розвитку та досягненні його збалансованості.

На основі  $RDI_n$  визначається й індекс національного розвитку  $RDI$ , зокрема, як мінімальне зі значень  $RDI_n$  по всіх регіонах країни  $n$  -

$$RDI = \min_n RDI_n .$$

## Висновки

Запропонований підхід відпрацьовується на практичних прикладах та використовується для формування стратегій розвитку регіонів країни. Він дозволив одночасно визначити уніфіковані об'єктивні оцінки їх стану та стратегії розвитку, що здебільшого не зустрічається в розглянутих багатьох системах індикаторів та індексів, та знайти відносно нескладні засоби оцінювання та порівняння різноманітних аспектів життєдіяльності та розвитку суспільства.

## 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, – <http://sustainabledevelopment.un.org/globalsdreport>.
2. Полумиенко С., Горда С. Основные концепции ресурсного теоретико-игрового подхода к моделированию сбалансированного развития. International Journal “Information Technologies & Knowledge”, Vol. 12, No. 1, 2018, pp. 72–83.
3. Butlin J. Our common future. By world commission on environment and development. London, Oxford University Press, Journal of International Development, 1987, 1 (2), pp. 284–287.
4. Gazdar K. Germany's Balanced Development: The Real Wealth of a Nation, 1998. - [https://books.google.com.ua/books?id=PQb7pkS10asC&pg=PA84&lpg=PA84&dq=balance+d+development&source=bl&ots=SvnKo1WPtv&sig=Ubsnf-wuHOWIP\\_kleyHEXz8ZrFw&hl=ru&sa=X&ved=0ahUKEwic3rv-rpjYAhVJL1AKHXIICBw4ChDoAQgmMAA#v=onepage&q=balanced%20development&f=false](https://books.google.com.ua/books?id=PQb7pkS10asC&pg=PA84&lpg=PA84&dq=balance+d+development&source=bl&ots=SvnKo1WPtv&sig=Ubsnf-wuHOWIP_kleyHEXz8ZrFw&hl=ru&sa=X&ved=0ahUKEwic3rv-rpjYAhVJL1AKHXIICBw4ChDoAQgmMAA#v=onepage&q=balanced%20development&f=false).
5. Цілі сталого розвитку, адаптовані для України (2015–2030 роки) за Національною доповіддю, 2017. – <http://www.un.org.ua/ua/tsili-rozvytku-tysiacholittia/tsili-staloho-rozvytku>.



6. Боссель Х. Показатели устойчивого развития: Теория, метод, практическое использование. Международный институт устойчивого развития. – Тюмень: Издательство Института проблем освоения Севера СО РАН, 2001. – 121 с. – <http://www.ipdn.ru/izdaniya-instituta/bossel/soderzhanie/>.
7. European Spatial Development Perspective Towards Balanced and Sustainable Development of the Territory of the EU, 1999. – [http://ec.europa.eu/regional\\_policy/sources/docoffic/official/reports/pdf/sum\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docoffic/official/reports/pdf/sum_en.pdf)
8. The Western Development Commission. Ireland. Balanced regional development – what does it mean? – <http://www.wdc.ie/balanced-regional-development-what-does-it-mean/>.
9. Sthapit, K. M. "SEED" - Concept of balance development: Example in soil conservation and watershed management (2006). – <http://lib.icimod.org/record/12361>.
10. A Balance Between Development and Conservation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nature.org/photos-and-video/video/about-us/index.htm>.
11. Tibet aims to balance development and ecology [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://english.gov.cn/news/video/2016/10/27/content\\_281475476279275.htm](http://english.gov.cn/news/video/2016/10/27/content_281475476279275.htm).
12. Stimme E. Proposed Downtown development aims to balance Pittsburgh's future with its history. - <https://www.nextpittsburgh.com/city-design/penn-avenue-facadeism/>.
13. Dubina I.N., Campbell D.F.J., Carayannis E.G., Chub A.A., Grigoroudis E., Kozhevina O.V. The Balanced Development of the Spatial Innovation and Entrepreneurial Ecosystem Based on Principles of the Systems Compromise: A Conceptual Framework Journal of the Knowledge Economy, December 2016. – <https://link.springer.com/article/10.1007/s13132-016-0426-0>
14. Kozminski A.K., Noga A., Piotrowska K., Zagorski K. The Balanced Development Index: Its Construction and Application in Times of Uncertainty, Poland 1999–2017. – <http://polish-sociological-review.eu/wp-content/uploads/2016/09/The-Balanced-Development-Index.pdf>.
15. Balanced Development Plan – <http://english.seoul.go.kr/policy-information/urban-planning/balanced-development-plan/>.
16. Ауман Р., Шепли Л. Значения для неатомических игр. – М.: Мир, 1977. – 357 с.
17. Полумієнко С.К., Стрижак О.С., Трофимчук О.М. Ресурсно-онтологічний підхід до оцінки рівня національного розвитку // Математичне моделювання в економіці, 2016. – №3–4. – С. 7–26.

## 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. <http://sustainabledevelopment.un.org/globalsdreport>.
2. Polumiienko S., Gorda S. Osnovnyye kontseptsii resursnogo teoretiko-igrovogo podkhoda k modelirovaniyu sbalansirovannogo razvitiya. International Journal “Information Technologies & Knowledge”, Vol. 12, No. 1, 2018, pp. 72–83.
3. Butlin J. Our common future. By world commission on environment and development. London, Oxford University Press, Journal of International Development, 1987, 1 (2). pp. 284–287.
4. Gazdar K. Germany's Balanced Development: The Real Wealth of a Nation, 1998. – [https://books.google.com.ua/books?id=PQb7pkSl0asC&pg=PA84&lpg=PA84&dq=balance+d+development&source=bl&ots=SvnKo1WpTv&sig=Ubsnf-wuHOWIP\\_kleyHEXz8ZrFw&hl=ru&sa=X&ved=0ahUKEwic3rv-rpjYAhVJL1AKHXIICBw4ChDoAQgmMAA#v=onepage&q=balanced%20development&f=false](https://books.google.com.ua/books?id=PQb7pkSl0asC&pg=PA84&lpg=PA84&dq=balance+d+development&source=bl&ots=SvnKo1WpTv&sig=Ubsnf-wuHOWIP_kleyHEXz8ZrFw&hl=ru&sa=X&ved=0ahUKEwic3rv-rpjYAhVJL1AKHXIICBw4ChDoAQgmMAA#v=onepage&q=balanced%20development&f=false).
5. Tsili staloho rozvytku, adaptovani dlya Ukrayiny (2015–2030 roky) za Natsional'noyu dopovidydu, 2017. <http://www.un.org.ua/ua/tsili-rozvytku-tysiacholititia/tsili-staloho-rozvytku>.

6. Bossel' Kh. Indicators for Sustainable Development: Theory, Method, Applications: a Report to the Balaton Group. International Institute for Sustainable Development, 2001. – 121 p.
7. European Spatial Development Perspective Towards Balanced and Sustainable Development of the Territory of the EU, 1999. [http://ec.europa.eu/regional\\_policy/sources/docoffic/official/reports/pdf/sum\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/regional_policy/sources/docoffic/official/reports/pdf/sum_en.pdf)
8. The Western Development Commission. Ireland. Balanced regional development – what does it mean? <http://www.wdc.ie/balanced-regional-development-what-does-it-mean/>.
9. Sthapit, K. M. "SEED". Concept of balance development: Example in soil conservation and watershed management (2006). <http://lib.icimod.org/record/12361>.
10. A Balance Between Development and Conservation. <https://www.nature.org/photos-and-video/video/about-us/index.htm>.
11. Tibet aims to balance development and ecology. [http://english.gov.cn/news/video/2016/10/27/content\\_281475476279275.htm](http://english.gov.cn/news/video/2016/10/27/content_281475476279275.htm).
12. Stimme E. Proposed Downtown development aims to balance Pittsburgh's future with its history. - <https://www.nextpittsburgh.com/city-design/penn-avenue-facadeism/>.
13. Dubina I.N., Campbell D.F.J., Carayannis E.G., Chub A.A., Grigoroudis E., Kozhevina O.V. The Balanced Development of the Spatial Innovation and Entrepreneurial Ecosystem Based on Principles of the Systems Compromise: A Conceptual Framework Journal of the Knowledge Economy, December 2016. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13132-016-0426-0>
14. Kozminski A.K., Noga A., Piotrowska K., Zagorski K. The Balanced Development Index: Its Construction and Application in Times of Uncertainty, Poland 1999–2017. <http://polish-sociological-review.eu/wp-content/uploads/2016/09/The-Balanced-Development-Index.pdf>.
15. Balanced Development Plan. <http://english.seoul.go.kr/policy-information/urban-planning/balanced-development-plan/>.
16. Aumann R., Shapley L. Znacheniya dlya neatomicheskikh igr. – M.: Mir, 1977. – 357 s.
17. Polumiienko S.K., Stryzhak O.E., Trofymchuk O.M. Resource-ontological approach to the national development evaluation. Mathematical Modelling in Economy. 2016. 7(3–4): 7-26.

*Стаття надійшла до редакції 27.12.2019.*

**В.М. ТРИСНЮК, К.В. СМЕТАНІН, Т.В. ТРИСНЮК, А.В. КУРИЛО**

## **УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ СМІТТЄЗВАЛИЩ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ДИСТАНЦІЙНО ПІЛОТОВАНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ**

***Анотація.** В статті запропонована технологія синтезу алгоритму керування для забезпечення стабілізації дистанційно пілотованого літального апарату на оперативній програмованій траєкторії. Розроблено алгоритм керування детермінованою багатовимірною автоматичною системою, який забезпечує стабілізацію об'єкта керування (дистанційно пілотованого літального апарату) на оперативній програмованій траєкторії. При цьому формування програмної траєкторії здійснюється дистанційно оператором по каналу зв'язку з ДПЛА. Показано, що процес оптимізації по обґрунтованій технології володіє високою швидкістю збіжності. Практично за 3 цикли наближення досягається стає значення функціонала, що мінімізується, що дозволяє здійснювати синтез керування у процесі польоту дистанційно пілотованого літального апарату в реальному часі.*

***Ключові слова:** зворотна задача динаміки, перехідний процес, програмна траєкторія руху, система керування, час перехідного процесу, якість керування.*

**DOI: 10.35350/2409-8876-2020-18-1-19-26**

### **Вступ**

Традиційний спосіб отримання інформації про стан навколишнього природного середовища і техногенних об'єктів, який здійснюється наземними службами, не завжди забезпечує необхідну оперативність оновлення даних. Застосування космічних знімків високої роздільної здатності та сучасних програмних засобів обробки, використання мобільних екологічних комплексів дозволяють отримати інформацію про навколишнє середовище, створити базу даних цифрових тематичних карт і статистичних даних різного рівня. Це дозволяє підвищити рівень екологічної безпеки довкілля та техногенних об'єктів.

Одним з перспективних методів проведення екологічного моніторингу є дистанційний, що базується на основі комплексного використання космічних, повітряних та рухомих наземних комплексів систем спостереження. У якості повітряних комплексів розглядаються безпілотні літальні апарати (БПЛА), дистанційно пілотовані літальні апарати (ДПЛА).

Враховуючи антропогенний вплив на природу, постійну зміну навколишнього середовища під впливом промислових об'єктів, а також параметрів атмосфери Землі, виникає необхідність достовірного виконання завдань екологічного прогнозування та екологічної безпеки на основі застосування екологічного моніторингу. Тому розширення можливостей

екологічного моніторингу можна здійснити з використанням рухомих екологічних комплексів, дистанційно пілотованих літальних апаратів і космічних систем спостереження при використанні дистанційних методів контролю параметрів довкілля, а також за рахунок удосконалення науково-методичного апарату оцінки стану зон екологічного ризику.

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

Особливість системи керування ДПЛА полягає в тому, що у зв'язку зі змінами польотних завдань потрібно корегувати алгоритми керування. Це потребує формування відповідних алгоритмів керування у реальному часі польоту ДПЛА. Існуючі підходи до оптимального керування передбачають обчислювальні процедури, які у реальному часі не можуть бути реалізовані на ДПЛА. Тому проблематика розробки та впровадження систем оптимального керування ДПЛА є актуальною. Метою дослідження є підвищення рівня екологічної безпеки за рахунок удосконалення технологічного процесу та устаткування бортового обладнання дистанційно пілотованого літального апарату. Об'єктом дослідження є процес застосування дистанційно пілотованих літальних апаратів в системі екологічного моніторингу.

## **2. Виклад основного матеріалу дослідження**

Аналіз останніх досліджень і публікацій доводить, що на сьогодні напрацьовано різні методи, механізми, принципи і методики визначення стану навколишнього природного середовища при проведенні екологічного моніторингу з використанням аерокосмічних технологій. Це підтверджується проведеними дослідженнями та працями в галузі застосування аерокосмічних технологій для завдань екології та природокористування таких вчених, як О.А. Адаменко, Я.О. Адаменко, В.П. Горбулін, Г.Я. Красовський, В.І. Лялько, О.А. Машков, В.Б. Мокін, Д.П. Пашков, Г.І. Рудько, О.М. Трофимчук, В.М. Триснюк та інші [1–5].

Для якісного та своєчасного проведення екологічного моніторингу за допомогою ДПЛА розглядається можливість застосувати комбінований підхід, який включає: на першому етапі – виділення району спостереження та отримання його характерних особливостей, на другому – здійснити вибір бортового обладнання ДПЛА, яке дозволить просторово виявити та більш детально визначити розміри зон ураження з урахуванням висотного профілю атмосферної зони, а на третьому – передача інформації з ДПЛА. Однак такий підхід має ряд зауважень, які пов'язані з можливостями бортового обладнання, що не дозволяє достовірно провести екологічний моніторинг.

За своєю структурою система моніторингу навколишнього середовища і екологічно небезпечних техногенних об'єктів повинна виконувати такі функції: збір інформації про об'єкт моніторингу; обробка, зведення, угруповання і зберігання інформації; моделювання (імітація, організація взаємозв'язків, навчання) фізико-хімічних процесів різних видів геоекосистем; оцінка поточного стану геоекосистем; прогноз стану геоекосистем; зворотний зв'язок, оцінка дефіциту інформації та її оптимізація [6] (рис. 1).

Синтез системи мобільного екологічного моніторингу з використанням аерокосмічних технологій передбачає створення таких її підсистем:

1. Підсистема збору та експрес-аналіз даних.
2. Підсистема первинної обробки і накопичення даних.
3. Підсистема комп'ютерного картографування.
4. Підсистема оцінки стану атмосфери.
5. Підсистема оцінки стану ґрунтово-рослинних покривів.
6. Підсистема оцінки стану водного середовища території.
7. Підсистема оцінки рівня екологічної безпеки і ризику для здоров'я населення території.
8. Підсистема ідентифікації причин порушення екологічного та санітарного стану.
9. Підсистема інтелектуальної підтримки прийняття рішень.

Характерною рисою запропонованої методики є нововведені структурні елементи для визначення складу бортового обладнання, визначення кількості ДПЛА та визначення оптимального маршруту руху безпілотної апарату відповідно до виконання поставленого екологічного завдання. Розглянемо їх.

*Визначення складу бортового комплексу ДПЛА*

При використанні ДПЛА під час проведення екологічного моніторингу, для ефективної їх експлуатації виникає питання про вибір раціонального варіанта рішення, а також найбільшого ефекту в заданому діапазоні умов використання [7]. При виявленні оптимального варіанта рішення завдання в системі екологічного моніторингу під час спостереження необхідно враховувати не тільки склад бортового обладнання, але й сукупність умов їх використання залежно від маршруту руху ДПЛА.



Рисунок 1 – Розвинута методика проведення екологічного моніторингу з використанням ДПЛА

Таким чином, для визначення ефективного варіанта щодо рішення виконання завдання екологічного моніторингу буде розраховуватися за виразом:

$$W = \sum_{i=1}^3 W_i(A_i)p_i = W_1(A_1)p_1 + W_2(A_2)p_2 + W_3(A_3)p_3, \quad (1)$$

де  $W_1(A_1)$  – показник ефективності застосування необхідного бортового обладнання в системі управління ДПЛА (залежно від необхідного);

$W_2(A_2)$  – показник ефективності застосування необхідного бортового обладнання для виконання завдання спостереження ДПЛА (залежно від кількості та якості завдання спостереження);

$W_3(A_3)$  – показник ефективності застосування алгоритму руху ДПЛА по заданому маршруту;

$p_i$  – ймовірність виконання поставленого завдання.

Одним з основних завдань є визначення координат об'єктів спостереження, що раптово з'являються. При цьому положення цих об'єктів може характеризуватися відповідними статистичними характеристиками невизначеності.

У такому випадку ймовірність виконання завдання бортовими системами ДПЛА можна визначити за виразом:

$$W_2 = \sum_{i=1}^m W_i P_{em}, \quad (2)$$

де  $W_i$  – ймовірність виконання завдання моніторингу бортовими системами ДПЛА зі здобуття і обробки відповідної інформації.

Час проведення екологічного моніторингу ДПЛА і передачі даних можна визначити за виразом

$$T = T_c + T_{об} + T_{np}, \quad (3)$$

де  $T_c$  – час зйомки бортовими системами ДПЛА;

$T_{об}$  – час первинної обробки інформації на борту;

$T_{np}$  – час передачі даних з ДПЛА на НПУ.

При цьому, ймовірність виконання проведення ЕМ із застосуванням ДПЛА буде залежати від ймовірності виявлення (визначення) антропогенного впливу під час зйомки

$$P_{em} = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \frac{1}{\langle t_{ос} \rangle} e^{-\frac{1}{\langle t_{ос} \rangle} t} \left[ \Phi\left(\frac{t - m_T}{\sqrt{2D_T}}\right) + \Phi\left(\frac{m_T}{\sqrt{2D_T}}\right) \right] dt, \quad (4)$$

де  $\Phi(\dots)$  – функція Крампа (інтеграл ймовірності);

$m_T$  – математичні очікування зйомки;

$D_T$  – дисперсії випадкових величин зйомки;

$t_{ov}$  – середній час поширення отруйної речовини в середовищі.

Істотною особливістю процесів функціонування бортових систем ДПЛА є їх випадковість, яка викликана неповною визначеністю умов, в яких ці процеси протікають, а також різними випадковими відхиленнями і помилками, що виникають при зборі інформації, виробленні дій, що управляють, та їх виконанні [8, 9]. Отже, результат функціонування бортових систем ДПЛА є стохастичним і з кількісного боку характеризується законами розподілу параметрів, що визначають цей результат.

Тому на початку досліджень необхідно визначитися з можливістю виконання екологічних завдань ДПЛА, що будуть застосовуватися для проведення екологічного моніторингу. Для виконання поставленого завдання в ході проведення екологічного моніторингу за допомогою ДПЛА потрібно врахувати умови функціоналу

$$f = \{\tau, P, N, C\}, \quad (5)$$

де  $\tau$  – час виконання ДПЛА поставленого завдання для виконання екологічного моніторингу ( $\tau = \frac{T}{N} \rightarrow \min_N$  при  $T = T(N_1, N_2, \dots, N_n) \rightarrow \min$ );

$P$  – ймовірність виконання поставленого завдання ДПЛА в ході проведення ЕМ ( $P = \prod_{i=1}^n P(N_i) \rightarrow \max$ );

$N$  – кількість ДПЛА, необхідних для виконання поставленого завдання ЕМ ( $N = \sum_{i=1}^n N_i \rightarrow \min$ );

$C$  – вартість, яка необхідна для застосування ДПЛА при виконанні поставленого завдання ЕМ ( $C = \sum_{i=1}^n C(N_i) \rightarrow \min$ ).

Доступність урбаністичних ландшафтів для дистанційних спостережень різна і залежить насамперед від виду, якості, часу, масштабу зйомки, тобто від усіх параметрів. Більшість характеристик ландшафту – рельєф, рослинність, ґрунти, поверхневі води, явища антропогенної діяльності й техногенні об'єкти – добре відображаються на аеро- та космічних знімках у різних спектральних діапазонах або на синтезованих зображеннях [10]. Усі вони утворюють зовнішній вигляд ландшафту, його фізіономічні ознаки (рис. 2).

Оперативний контроль за станом техногенних геоекосистем, управління природними ресурсами, дослідження динаміки протікання природних процесів і явищ, аналізу причин екологічних забруднень, прогнозування можливих наслідків і вибору способів попередження надзвичайних ситуацій є невід'ємним атрибутом методології збору інформації про стан території, що досліджується (країна, регіон, місто) [11].



Рисунок 2 – Чергування різних ландшафтних структур і типів природокористування за даними ДПЛА

На основі отриманих результатів розроблено науково-практичні рекомендації, у яких запропоновано послідовно виконувати дії для виділення техногенного забруднення та визначення стану довкілля за допомогою ДПЛА, що дозволяє оперативно приймати управлінські рішення для зменшення негативних впливів та забезпечення екологічної безпеки регіону (рис. 3).

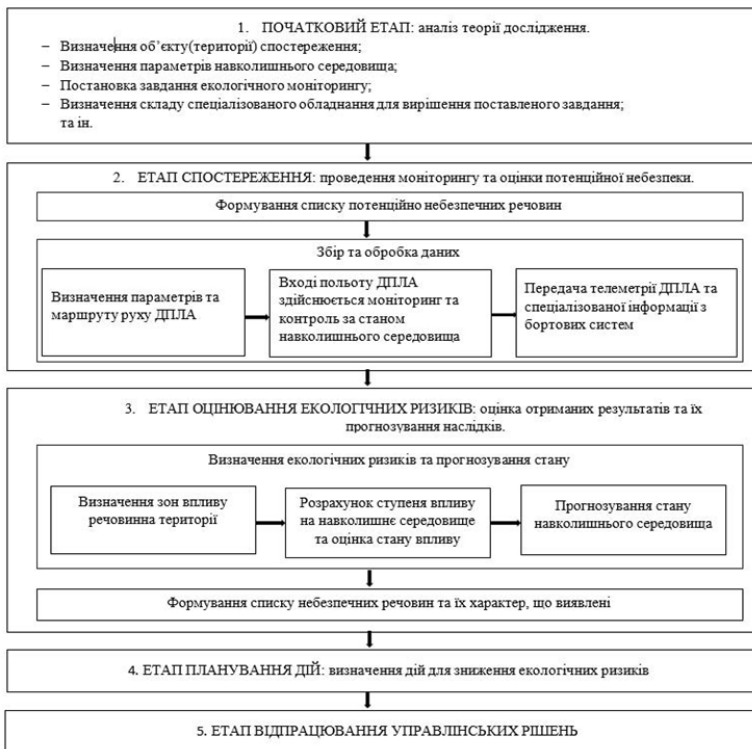


Рисунок 3 – Алгоритм проведення екологічного моніторингу за допомогою ДПЛА



Під час проведення дослідження були відпрацьовані науково-методичні підходи, на основі яких удосконалено процедуру проведення екологічного моніторингу з використанням ДПЛА, яка є основою оперативного виявлення забруднювачів в ході проведення спостереження за заданою територією.

## Висновки

Запропоновано аналітичну модель оцінювання якості виконання екологічних завдань моніторингу засобами ДПЛА, особливістю якої є пошук структури за оптимальними параметрами бортового обладнання літального апарата з урахуванням особливостей визначення характеру антропогенного впливу на стан довкілля.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що на основі вдосконаленого науково-методичного апарату використання ДПЛА в системі екологічного моніторингу розроблено нові підходи комплексного спостереження навколишнього середовища заданої території на основі застосування несучої апаратури на борту ДПЛА, реалізовано пропозиції щодо якісної оцінки та контролю параметрів навколишнього середовища при вирішенні завдань екологічного моніторингу.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. V. Trysnyuk, T. Trysnyuk, V. Okhariev, V. Shumeiko, A. Nikitin Cartographic Models of Dniester River Basin Probable Flooding Centrul Universitar Nord Din Bala Mare - UTPRESS ISSN 1582-0548, №1, 2018 С. 61–67.
2. Grekov L.D., Krasovsky G.Y., Trofimchuk O.M. Space monitoring of land pollution by man-made dust. Kiev. Scientific thought. 2007. – 219 p.
3. Триснюк В.М. Моніторинг використання та екологічного стану земель за допомогою безпілотних літальних апаратів / Триснюк В.М., Шумейко В.О., Кащишин О.В., Курило А.В., Сметанін К.В. // Сучасні інформаційні системи. – Х.: Т.2. № 4, – 2018. – С. 124–127.
4. Trisnyuk V.M Environmental safety management system for natural and anthropogenically modified geosystems. Information processing systems. – 2016. – №12. – P. 185–188. Index Copernicus
5. Триснюк В.М. Особливості побудови мобільної системи екологічного моніторингу оперативного визначення стану довкілля / В.М. Триснюк, К.В. Сметанін // Матеріали науково-технічної конференції «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління», (м. Полтава–Баку–Харків–Жиліна, 26-27 квітня 2018 р.). – Харків: ФОП Петров В.В., 2018. – С. 93.
6. Myrontsov, M.L. [2019] The problem of equivalence in inverse electrometry problems of oil and gas wells. 18th International Conference Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects, Extended Abstracts.
7. Trofymchuk, O., Kalyukh, Y., Hlebchuk, H. [2013] Mathematical and GIS-modeling of landslides in Kharkiv region of Ukraine. Landslide Science and Practice: Spatial Analysis and Modelling. – Springer, Berlin, Heidelberg. 347–352.
- 8 Trofymchuk, O., Kreta, D., Myrontsov, M., Okhariev, V., Shumeiko, V., Zagorodnia, S. [2015] Information Technology in Environmental Monitoring for Territorial System Ecological Assessment. Journal of Environmental Science and Engineering. A4, 79–84.
9. Trysnyuk, V.M., Okhariev, V.O., Trysnyuk, T.V., Zorina, O.V., Kurylo, A.V., Golovan, Y.V., Smetanin, K.V., Radlowska, K.O. [2019] Improving the algorithm of satellite images landscape interpretation. 18th International Conference Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects, Extended Abstracts.

10. Trysnyuk, V., Trysnyuk, T., Okhariev, V., Shumeiko, V., Nikitin, A. [2018] Cartographic Models of Dniester River Basin Probable Flooding. Centrul Universitar Nord Din Bala Mare – UTPRESS ISSN 1582-0548.
11. Триснюк В.М. Розробка системи оперативного моніторингу територій з використанням ДПЛА / В.М. Триснюк, К.В. Сметанін // Матеріали II Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Наука III тисячоліття: пошуки, проблеми, перспективи розвитку», (м. Бердянськ, 25-26 квітня 2018 р.). – м. Бердянськ: БДПУ, 2018. – С. 187–189.

## REFERENCES

1. V. Trysnyuk, T. Trysnyuk, V. Okhariev, V. Shumeiko, A. Nikitin Cartographic Models of Dniester River Basin Probable Flooding Centrul Universitar Nord Din Bala Mare – UTPRESS ISSN 1582-0548, №1, 2018 C. 61–67.
2. Trysnyuk V.M. Création d'un système mobile de surveillance de l'environnement / V.M. Trisnyuk, V.O. Oharev, T.V. Trisnyuk, K.V. Smetanin, A.V. Kurilo // Sécurité écologique et utilisation équilibrée des ressources. Ivano-Frankivsk: Symphonie du fort. – 2018, n 2 (18) – p. 120–128.
3. Trysnyuk V.M. Surveillance de l'utilisation des terres et de l'état écologique par des véhicules aériens sans pilote / Trisnyuk V.M., Shumeiko V.A., Kashchishin O.V., Kurilo A.V., Smetanin K.V. // Systèmes d'information modernes. – X.: T.2. N 4, 2018 – C. 124–127.
4. Trysnyuk V.M. Environmental safety management system for natural and anthropogenically modified geosystems. Information processing systems. – 2016. – №12. – P. 185–188. Index Copernicus
5. Trysnyuk VM Caractéristiques de la construction d'un système mobile de surveillance environnementale de la détermination opérationnelle de l'état de l'environnement / V.M. Trisnyuk, KV Smetanin // Actes de la conférence scientifique et technique "Tendances modernes dans le développement des technologies de l'information et de la communication et des outils de gestion" (Poltava-Baku-Kharkiv-Zhilina, 26-27 avril 2018). – Kharkiv: FOP Petrov VV, 2018. – P. 93.
6. Myrontsov, M.L. [2019] The problem of equivalence in inverse electrometry problems of oil and gas wells. 18th International Conference Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects, Extended Abstracts.
7. Trofymchuk, O., Kalyukh, Y., Hlebuch, H. [2013] Mathematical and GIS-modeling of landslides in kharkiv region of Ukraine. Landslide Science and Practice: Spatial Analysis and Modelling. – Springer, Berlin, Heidelberg. 347–352.
- 8 Trofymchuk, O., Kreta, D., Myrontsov, M., Okhariev, V., Shumeiko, V., Zagorodnia, S. [2015] Information Technology in Environmental Monitoring for Territorial System Ecological Assessment. Journal of Environmental Science and Engineering. A4, 79–84.
9. Trysnyuk, V.M., Okhariev, V.O., Trysnyuk, T.V., Zorina, O.V., Kurylo, A.V., Golovan, Y.V., Smetanin, K.V., Radlowska, K.O. [2019] Improving the algorithm of satellite images landscape interpretation. 18th International Conference Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects, Extended Abstracts
10. Trysnyuk, V., Trysnyuk, T., Okhariev, V., Shumeiko, V., Nikitin, A. [2018] Cartographic Models of Dniester River Basin Probable Flooding. Centrul Universitar Nord Din Bala Mare – UTPRESS ISSN 1582-0548
11. Trysnyuk VM Développement du système de suivi opérationnel des territoires avec l'utilisation de drones / V.M. Trisnyuk, KV Smetanin // Actes de la deuxième conférence internationale scientifique et pratique sur Internet "La science du millénaire: quêtes, problèmes, perspectives de développement", (Berdyansk, 25-26 avril 2018). – Berdyansk: BSPU, 2018. – P. 187–189.

*Стаття надійшла до редакції 11.11.2019.*

# МАТЕМАТИЧНІ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ МОДЕЛІ В ЕКОНОМІЦІ

УДК 615.47:621

<http://orcid.org/0000-0001-7311-4103>  
<http://orcid.org/0000-0002-6559-0721>  
<http://orcid.org/0000-0002-9717-4538>  
<http://orcid.org/0000-0001-9920-4879>  
<http://orcid.org/0000-0003-1582-3088>

**Я.В. ЛИТВИНЕНКО, С.А. ЛУПЕНКО, П.А. ОНИСЬКІВ,  
В.М. ТРИСНЮК, А.М. ЗОЗУЛЯ**

## ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО АНАЛІЗУ СЕРЦЕВОГО РИТМУ НА ОСНОВІ ВЕКТОРНОГО РИТМОКАРДІОСИГНАЛУ

***Анотація.** У роботі розглядається модернізований програмний комплекс для аналізу серцевого ритму з підвищеною інформативністю. Збільшення інформативності досягається за рахунок використання нової математичної моделі сигналів серця, у вигляді умовного циклічного випадкового процесу та нових методів його опрацювання. Загалом, програмний комплекс дає змогу проводити автоматизований аналіз електрокардіосигналу, зокрема морфологічний аналіз та аналіз серцевого ритму на основі сформованого векторного ритмокардіосигналу (ритмокардіограми) з підвищеною інформативністю. Розроблений комплекс програм дає змогу проводити автоматизований аналіз серцевого ритму на основі опрацювання електрокардіосигналу та аналізу сформованого векторного ритмокардіосигналу (ритмокардіограми) з підвищеною інформативністю.*

***Ключові слова:** програмний комплекс, електрокардіосигнал, ритмокардіосигнал, серцевий ритм.*

**DOI: 10.35350/2409-8876-2020-18-1-27-38**

### Вступ

Важливе місце серед процесів та явищ дійсності посідають такі, які, розгортаючись у часі, відображають структуру, що повторюється. До таких процесів, сигналів належать електрокардіосигнали. Багатолітній накопичений досвід опрацювання яких в медицині та сучасні потреби діагностичної практики вимагають створення нових ефективних математичних засобів, які б дозволяли підвищити точність, достовірність та інформативність опрацювання циклічних сигналів, зокрема електрокардіосигналів.

© Я.В. Литвиненко, С.А. Лупенко, П.А. Ониськів, В.М. Триснюк, А.М. Зозуля, 2020

Тому, розробка високоінформативних програмних комплексів для автоматизованої діагностики стану серця людини за зареєстрованими електрокардіосигналами є актуальною науково-технічною задачею, вирішення якої дозволить підвищити якість та ефективність діагностування, а відповідно і медичного обслуговування населення.

В працях [1, 2] обґрунтовано нові математичні моделі та методи опрацювання циклічних електрокардіосигналів, розроблені на їх основі. Це дало змогу підвищити точність та достовірність діагностування функціонального стану серця завдяки підвищеній інформативності під час аналізу ритму. У роботах [3, 4], розроблено програмний комплекс для моделювання та морфологічного аналізу кардіосигналів, який був модернізований та втілює нові розроблені модель та методи опрацювання при дослідженні ритму.

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

Одним із підходів до опрацювання та моделювання електрокардіосигналів є підхід з використанням в якості математичної моделі умовного циклічного випадкового процесу та його випадкової функції ритму [1]. Це дає змогу підвищити інформативність аналізу кардіосигналів завдяки врахуванню їх подвійної стохастичності – стохастичності ритму та стохастичності у морфологічній структурі електрокардіосигналів.

Дану роботу присвячено удосконаленню програмного комплексу, де на відміну від попередньої розробки [3, 4], у комплекс інтегровано новий підхід, що передбачає опрацювання кардіосигналів на базі умовного циклічного випадкового процесу та його випадкової функції ритму, і створених нових методів аналізу ритму на їх основі, що в цілому, разом з методами морфологічного аналізу, дає змогу отримати більш повну діагностичну інформацію про стан серцево-судинної системи людини.

Мета роботи полягає в модернізації програмного комплексу для аналізу серцевого ритму з підвищеною інформативністю, за рахунок використання нової математичної моделі сигналів серця, у вигляді умовного циклічного випадкового процесу та нових методів його опрацювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

1 Обґрунтувати математичне забезпечення програмного комплексу для аналізу серцевого ритму з підвищеною інформативністю.

2 Розробити структурно-функціональну схему модернізованого програмного комплексу.

3 Розробити комплекс програм для аналізу серцевого ритму з підвищеною інформативністю на основі опрацювання векторного ритмокардіосигналу.

4 Провести апробацію програмного комплексу на реальних електрокардіосигналах.

## **2. Виклад основного матеріалу дослідження**

Наведемо основні математичні співвідношення, які лежать в основі математичного забезпечення модернізованого програмного комплексу. При цьому зосередимо увагу на розробленій частині комплексу, яка стосується

аналізу серцевого ритму на основі векторного ритмокардіосигналу. Загалом, програмний комплекс дає змогу проводити автоматизований аналіз електрокардіосигналу, зокрема морфологічний аналіз та аналіз серцевого ритму на основі сформованого векторного ритмокардіосигналу (ритмокардіограми) з підвищеною інформативністю.

**Математична модель у вигляді умовного циклічного випадкового процесу.**

Згідно із роботами [5, 6], умовним циклічним випадковим процесом називають процес  $\{\xi(\omega, \omega', t), \omega \in \Omega, \omega' \in \Omega', t \in \mathbf{R}\}$ , який задано на декартовому добутку двох стохастично незалежних ймовірнісних просторів із множинами елементарних подій  $\Omega$  та  $\Omega'$  та на множині дійсних чисел  $\mathbf{R}$ , і для якого виконуються такі умови:

1) існує така випадкова функція  $T(\omega', t, n), \omega' \in \Omega', t \in \mathbf{R}, n \in \mathbf{Z}$ , що для кожної  $\omega'$  відповідна  $\omega'$ -реалізація  $T_{\omega'}(t, n)$  цієї функції задовольняє умовам функції ритму;

2) для кожної  $\omega'$  із  $\Omega'$  скінченновимірні вектори  $(\xi_{\omega'}(\omega, t_1), \xi_{\omega'}(\omega, t_2), \dots, \xi_{\omega'}(\omega, t_k))$  та  $(\xi_{\omega'}(\omega, t_1 + T_{\omega'}(t_1, n)), \xi_{\omega'}(\omega, t_2 + T_{\omega'}(t_2, n)), \dots, \xi_{\omega'}(\omega, t_k + T_{\omega'}(t_k, n)), n \in \mathbf{Z}$ , де  $\{t_1, t_2, \dots, t_k\}$  – множина сепарабельності процесу  $\xi_{\omega'}(\omega, t), \omega' \in \Omega', \omega \in \Omega, t \in \mathbf{R}$ , при всіх цілих  $k \in \mathbf{N}$  є стохастично еквівалентними у широкому розумінні;

3) для будь-яких різних  $\omega'_1 \in \Omega'$  та  $\omega'_2 \in \Omega'$  випадкові процеси  $\xi_{\omega'_1}(\omega, t)$  та  $\xi_{\omega'_2}(\omega, t)$  є ізоморфними відносно порядку та значень циклічними випадковими процесами.

Реалізацією ( $\omega'$ -реалізацією) випадкової функції  $T(\omega', t, n)$  є детермінована функція  $T_{\omega'}(t, n)$ , яка задовольняє умовам функції ритму, а саме:

- 1) групі умов:
  - a)  $T_{\omega'}(t, n) > 0$ , якщо  $n > 0$  ( $T_{\omega'}(t, 1) < \infty$ );
  - b)  $T_{\omega'}(t, n) = 0$ , якщо  $n = 0$ ;
  - c)  $T_{\omega'}(t, n) < 0$ , якщо  $n < 0, t \in \mathbf{R}$ ; для будь-яких  $t_1 \in \mathbf{R}$  та  $t_2 \in \mathbf{R}$ , для яких  $t_1 < t_2$ , для функції  $T_{\omega'}(t, n)$  виконується строга нерівність  $T_{\omega'}(t_1, n) + t_1 < T_{\omega'}(t_2, n) + t_2, \forall n \in \mathbf{Z}$ ;

4) функція  $T_{\omega'}(t, n)$  є найменшою за модулем ( $|T_{\omega'}(t, n)| \leq |T_{\omega'}^\gamma(t, n)|$ ) серед усіх таких функцій  $\{T_{\omega'}^\gamma(t, n), \gamma \in \Gamma\}$ , які задовольняють вище наведеним умовам 1 та 2.

Математичною моделлю ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю, згідно з роботами [4, 5], є дискретний випадковий процес

$$\left\{ T(\omega', t_{ml}, n), \omega' \in \Omega', t_{ml} \in \mathbf{R}, m \in \mathbf{Z}, l = \overline{1, L}, L \geq 2, n \in \mathbf{Z} \right\}, \quad \text{який}$$

вкладений у випадкову функцію ритму  $T(\omega', t, n), \omega' \in \Omega', t \in \mathbf{R}, n \in \mathbf{Z}$  умовного циклічного випадкового процесу  $\{\xi(\omega, \omega', t), \omega \in \Omega, \omega' \in \Omega', t \in \mathbf{R}\}$ . Математичною моделлю

ритмокардіосигналу (ритмокардіограми), відповідно, є  $\omega'$ -реалізація  $\left\{ T_{\omega'}(t_{ml}, n), t_{ml} \in \mathbf{R}, m \in \mathbf{Z}, l = \overline{1, L}, L \geq 2, n \in \mathbf{Z} \right\}$  дискретного випадкового

процесу  $\left\{ T(\omega', t_{ml}, n), \omega' \in \Omega', t_{ml} \in \mathbf{R}, m \in \mathbf{Z}, l = \overline{1, L}, L \geq 2, n \in \mathbf{Z} \right\}$ .

Тобто, областю визначення ритмокардіосигналу є дискретна множина дійсних чисел  $\mathbf{D} = \left\{ t_{ml}, m \in \mathbf{Z}, l = \overline{1, L}, L \geq 2 \right\}$ , де індекс  $m$  позначає

номер циклу електрокардіосигналу, а індекс  $l$  – номер відліку електрокардіосигналу в рамках його  $m$ -го циклу. Кількість відліків  $L$  на цикл електрокардіосигналу визначає роздільну здатність ритмокардіограми, та задає кількість фаз на циклі електрокардіосигналу, які можуть бути виділені методами сегментації та детектування при вирішенні завдання автоматичного формування ритмокардіосигналу із зареєстрованого електрокардіосигналу (електрокардіограми) [7–11].

$$\text{Вектор} \quad \Xi_L(\omega', m) = \left\{ T_l(\omega', m), \omega' \in \Omega', l = \overline{1, L}, m = \overline{1, M} \right\}$$

ритмокардіосигналу формується з оціненої функції ритму електрокардіосигналу [8, 9]. Далі проводиться статистична обробка компонент вектора. При цьому визначають математичне сподівання, дисперсію, проводиться оцінювання виду розподілу (перевірка його на нормальність) шляхом побудови гістограми та застосування критерію згоди  $\chi^2$  – Пірсона.

Наведемо основні математичні співвідношення для оцінювання ймовірнісних характеристик компонент вектора.

Вираз для обчислення реалізації статистичної оцінки  $\hat{c}_{1T_l}$  відповідної  $l$ -ї компоненти вектора початкового моменту першого порядку  $c_{1T_l}$  (математичного сподівання) стаціонарної випадкової послідовності  $T_l(\omega', m)$ , а саме:

$$\hat{c}_{1T_l} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M T_{l\omega'}(k), l \in \left\{ \overline{1, L} \right\}, \quad (1)$$

де  $M$  – кількість циклів зареєстрованої реалізації електрокардіосигналу,  $T_{l_{\omega'}}(k)$  –  $l$ -на компонента вектора ритмокардіосигналу.

Вираз для обчислення реалізації статистичної оцінки дисперсії  $r_{2T_l}$  стаціонарної випадкової послідовності  $T_l(\omega', m)$ , а саме:

$$\hat{r}_{2T_l} = \frac{1}{M-1} \sum_{k=1}^M (T_{l_{\omega'}}(k) - \hat{c}_{1T_l})^2, l \in \{\overline{1, L}\}. \quad (2)$$

Відомо, що кореляційні функції стаціонарних та стаціонарно пов'язаних випадкових послідовностей є функціями лише від одного цілочисельного аргументу  $u$ , який дорівнює  $u = m_1 - m_2$ , то і їх статистичні оцінки також залежать лише від одного аргументу  $u$ . У такому разі автокореляційна функція буде мати вигляд:

$$\hat{r}_{2T_{l_1 T_{l_2}}}(u) = \hat{r}_{2T_{l_1 T_{l_2}}}(m_1 - m_2) = \frac{1}{M - M_1 + 1} \sum_{k=0}^{M-M_1} (T_{l_{\omega'}}(k) - \hat{c}_{1T_{l_1}}) \cdot (T_{l_{\omega'}}(k+u) - \hat{c}_{1T_{l_2}}),$$

$$u = \overline{0, M_1 - 1}, m_1, m_2 \in \{\overline{1, M_1}\}, l_1, l_2 \in \{\overline{1, L}\}, \quad (3)$$

де  $M_1$  – кількість відліків кореляційної функції, глибина кореляції.

Зменшення кількості діагностичних ознак у інформаційних системах аналізу серцевого ритму на основі векторного ритмокардіосигналу із підвищеною інформативністю досягається використанням спектральних розкладів елементів трикутної матриці

$\hat{\mathbf{R}}_T = \left[ \hat{r}_{2T_{l_1 T_{l_2}}}(u), l_1 = \overline{1, L}, l_2 = \overline{l_1, L} \right]$ , зокрема, шляхом використання

дискретного перетворення Фур'є оцінок автокореляційних та взаємкореляційних функцій із цієї матриці. А саме, замість трикутної

матриці  $\hat{\mathbf{R}}_T = \left[ \hat{r}_{2T_{l_1 T_{l_2}}}(u), l_1 = \overline{1, L}, l_2 = \overline{l_1, L} \right]$  кореляційних функцій можна

використовувати трикутну матрицю  $\hat{\mathbf{S}}_T = \left[ \hat{S}_{2T_{l_1 T_{l_2}}}(v), l_1 = \overline{1, L}, l_2 = \overline{l_1, L} \right]$ ,

елементи якої є Фур'є-образами відповідних оцінок кореляційних функцій із матриці  $\hat{\mathbf{R}}_T$ . А саме, Фур'є-образи із матриці  $\hat{\mathbf{S}}_T$  обчислюються так:

$$\hat{S}_{2T_{l_1 T_{l_2}}}(v) = \sum_{u=0}^{M_1-1} \hat{r}_{2T_{l_1 T_{l_2}}}(u) \cdot e^{-j2\pi uv / M_1}, v = \overline{0, M_1 - 1}, l_1 = \overline{1, L}, l_2 = \overline{l_1, L}, j = \sqrt{-1}. \quad (4)$$

Виходячи із нерівності Бесселя, як діагностичні ознаки будемо обирати не всю множину  $\left\{ \hat{S}_{2T_1T_2}(\nu), \nu = \overline{0, M_1 - 1} \right\}$  відліків функцій  $\hat{S}_{2T_1T_2}(\nu)$ , а лише певну підмножину їх перших  $M_2$  ( $M_2 \ll M_1$ ) відліків  $\left\{ \hat{S}_{2T_1T_2}(\nu), \nu = \overline{0, M_2 - 1} \right\}$ , які роблять внесок у повну енергію оцінки  $\hat{r}_{2T_1T_2}(u)$  кореляційної функції не менше 95%.

Вищеописані математичні співвідношення для статистичного оцінювання векторного ритмокардіосигналу були втілені у програмний комплекс для аналізу серцевого ритму з підвищеною інформативністю, який складається з таких основних блоків:

1. Блок формування вектора ритмокардіосигналу.
2. Блок статистичної обробки (опрацювання) векторного ритмокардіосигналу, що включає в себе перевірку статистичних гіпотез про стаціонарність, нормальність розподілу та статистичного оцінювання параметрів та характеристик векторного ритмокардіосигналу, а саме математичного сподівання, дисперсії, автокореляційної функції та сумісної кореляційної функції компонент вектора.
3. Блок спектрального аналізу статистичних оцінок векторного ритмокардіосигналу із підвищеною інформативністю.

Структурно-функціональна схема удосконаленого програмного комплексу представлена на рисунку 1. Комплекс програм реалізовано мовою програмування Object pascal.

Процедура обробки досліджуваного ЕКС включає оцінювання сегментної структури за допомогою методів сегментації, наприклад [7–9]. Оцінювання функції ритму здійснюємо шляхом інтерполяції ритмічної структури (дискретної функції ритму), на основі методів [10, 11].

Після оцінювання ритмічної структури процес опрацювання розгалужується на два паралельних етапи. Перший етап здійснює морфологічний аналіз, який згідно з даною структурою передбачає статистичне опрацювання ЕКС, нормування статистичних оцінок та їх розклад у базисі Чебишева і прийняття рішення за отриманими морфологічними ознаками. Цей етап описаний в роботі [12]. Другий етап здійснює аналіз ритму і полягає у формуванні векторного ритмокардіосигналу, статистичної обробки вектора та спектрального аналізу отриманих статистичних оцінок.

Структура блоку формування векторного ритмокардіосигналу зображена на рисунку 2. Вона передбачає формування векторного ритмокардіосигналу, при цьому проводиться визначення тривалостей всіх сегментів зон електрокардіосигналу, зокрема P, Q, R, S, T та U за наявності, і формується векторний ритмокардіосигнал.

Як приклад на рисунку 3 поданий загальний вигляд інтерфейсу програми для оцінювання автокореляційної функції та взаємної кореляційної функції компонент векторного ритмокардіосигналу.



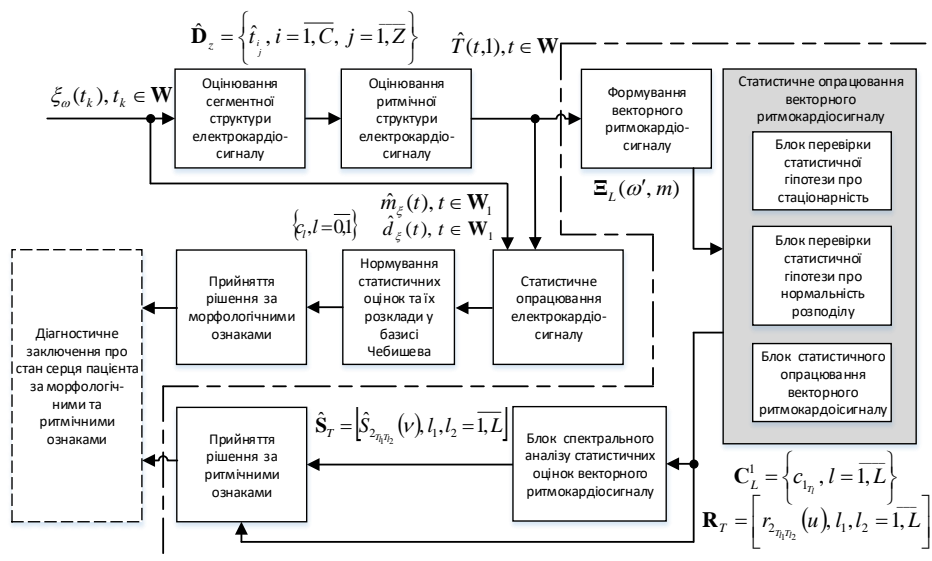


Рисунок 1 – Структурно-функціональна схема програмного комплексу для аналізу серцевого ритму з підвищеною інформативністю

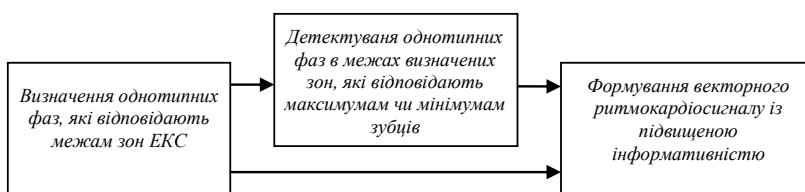


Рисунок 2 – Структурна схема методу формування векторного ритмокардіосигналу із підвищеною роздільною здатністю

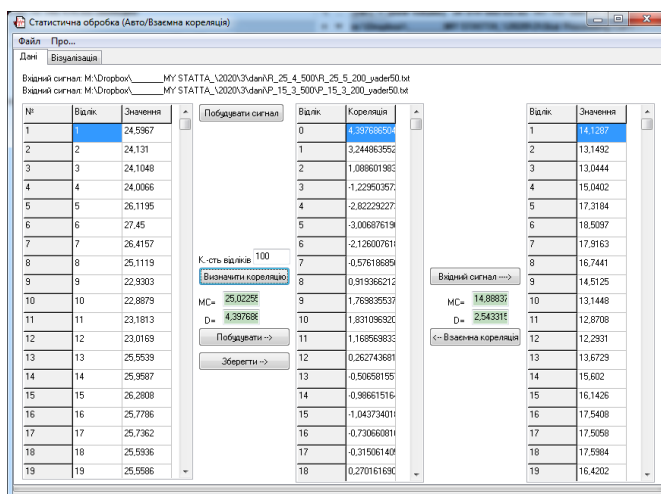


Рисунок 3 – Приклад інтерфейсу програми для оцінювання автокореляційної функції та взаємної кореляційної функції компонент векторного ритмокардіосигналу

На рисунках 4–7 наведені графіки для пояснення етапів роботи програмного комплексу при аналізі серцевого ритму з підвищеною інформативністю.

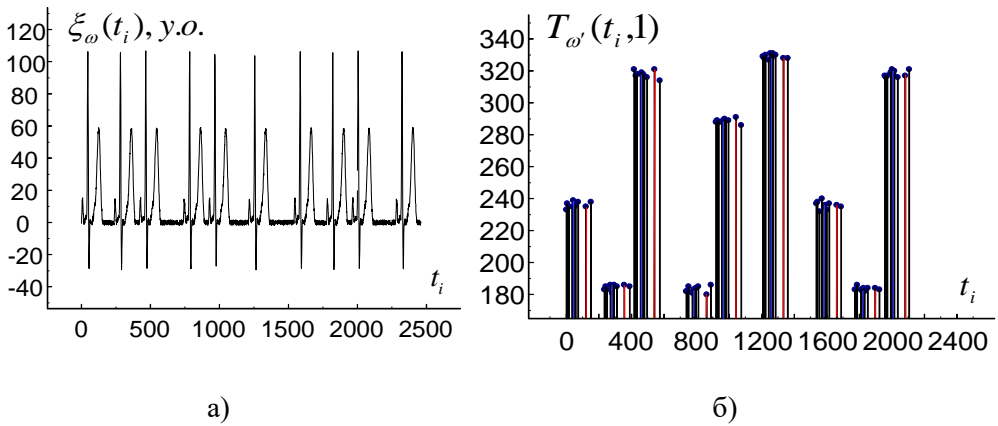


Рисунок 4 – Результати опрацювання:  
а) декілька циклів досліджуваного електрокардіосигналу;  
б) ритмічна структура електрокардіосигналу, червоним кольором виділені відліки, які відповідають R-R-інтервалам

Сформовані компоненти векторного ритмокардіосигналу наведені на рисунку 5.

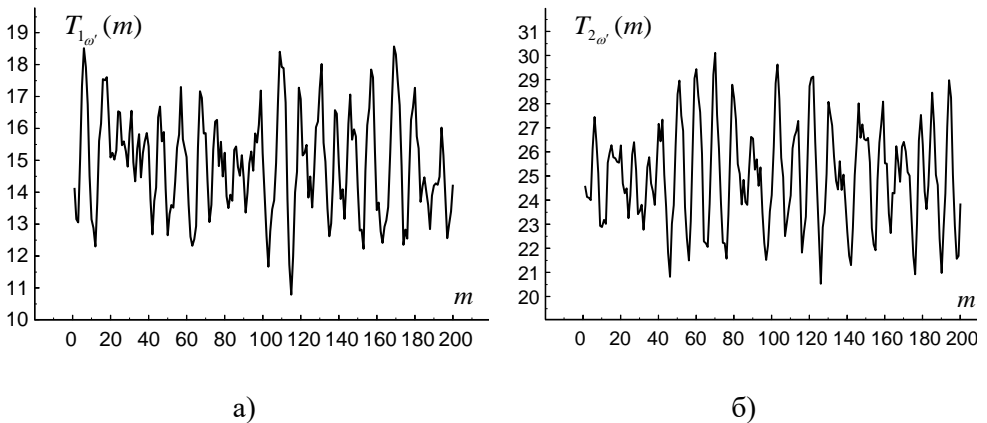
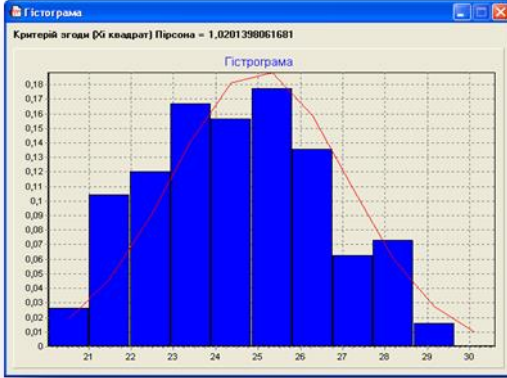
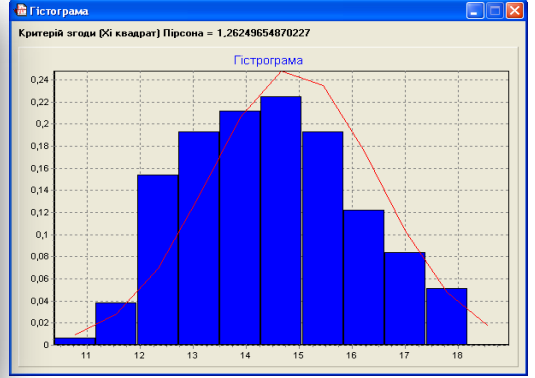


Рисунок 5 – Графік реалізацій  $T_{1\omega'}(m)$ ,  $T_{2\omega'}(m)$  компонент векторного ритмокардіосигналу першої компоненти  $T_1(\omega', m)$  та другої компоненти  $T_2(\omega', m)$ , що описують відповідно тривалості:

- а)  $P$ -інтервалів електрокардіосигналу;
- б)  $R$ -інтервалів електрокардіосигналу



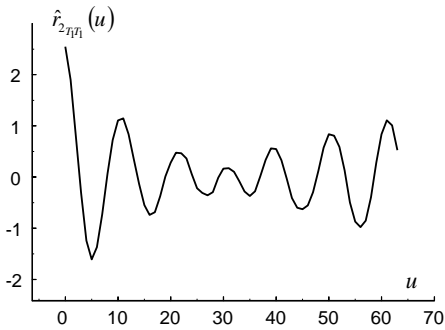
а)



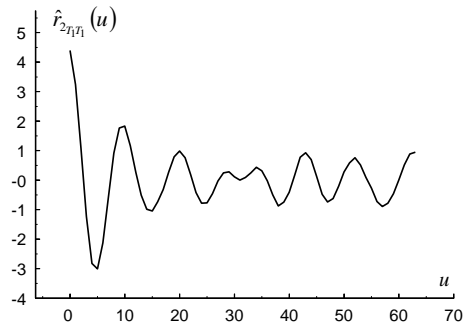
б)

Рисунок 6 – Гістограми реалізацій  $T_{1\omega'}(m)$ ,  $T_{2\omega'}(m)$  компонент векторного ритмокардіосигналу першої компоненти  $T_1(\omega', m)$  та другої компоненти  $T_2(\omega', m)$ , що описують відповідно тривалості:

- а)  $P$ -інтервалів електрокардіосигналу;
- б)  $R$ -інтервалів електрокардіосигналу



а)



б)

Рисунок 7 – Графік реалізацій  $\hat{r}_{2T_1T_1}(u)$  статистичних оцінок автокореляційних функцій  $r_{2T_1T_1}(u)$  ( $l_1 = l_2 = 1$ ) першої компоненти  $T_1(\omega', m)$  та другої компоненти  $T_2(\omega', m)$ , що описують відповідно тривалості:

- а)  $P$ -інтервалів електрокардіосигналу;
- б)  $R$ -інтервалів електрокардіосигналу

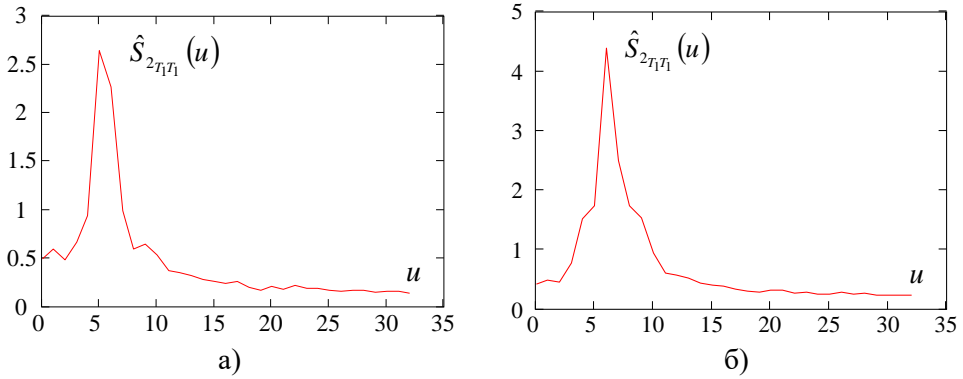


Рисунок 8 – Графік реалізацій  $\hat{S}_{2T_1T_1}(v)$  статистичних оцінок спектральних щільностей потужності  $S_{2T_1T_1}(v)$  ( $l_1 = l_2 = 1$ ) першої компоненти  $T_1(\omega', m)$  та другої компоненти  $T_2(\omega', m)$ , що описують відповідно тривалості:

- а)  $P$ -інтервалів електрокардіосигналу;
- б)  $R$ -інтервалів електрокардіосигналу

### Висновки

Модернізований програмний комплекс завдяки розширенню його математичного забезпечення, що ґрунтується на новому підході до опрацювання електрокардіосигналів на базі математичної моделі у вигляді умовного циклічного випадкового процесу, дає змогу проводити статистичний морфологічний аналіз та аналіз ритму кардіосигналів із підвищеною інформативністю на основі векторного ритмокардіосигналу, що уможливило підвищення точності та достовірності діагностики стану серцево-судинної системи організму людини на основі аналізу ритму.

Створений комплекс програм може бути використаний в якості складової частини спеціалізованого програмного забезпечення в автоматизованих діагностичних системах для комплексного морфоаналізу та аналізу серцевого ритму.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. С. Лупенко. Математичне моделювання циклічних сигналів серця з врахуванням стохастичності їх ритму та морфологічної структури. // Матеріали Всеукраїнської наукової конференції ТДТУ. Тернопіль 2009, С. 96.
2. Лупенко С., Сверстюк А., Луцик Н., Стадник Н., Зозуля А. Умовний циклічний випадковий процес як математична модель коливних сигналів та процесів із подвійною стохастичністю. Поліграфія і видавнича справа. Printing and Publishing, No.1 (71) 2016. Львів, 2016. С. 147–159.
3. Я.В. Литвиненко, С.А. Лупенко, А.С. Сверстюк. Програмний комплекс для обробки та моделювання синхронно зареєстрованих кардіосигналів з використанням моделей та методів теорії циклічних функціональних відношень. Вісник Хмельницького національного університету. 2009. №5. С. 80–87.

4. Луцик Н.С., Литвиненко Я.В., Лупенко С.А., Зозуля А.М. Програмний комплекс для морфологічного аналізу та аналізу серцевого ритму з підвищеною інформативністю. Журнал Вінницького національного технічного університету «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія». Вінниця, 2016. №1 (35). С. 13–22.
5. S. Lupenko, N. Lutsyk, O. Yasniy and Ł. Sobaszek, “Statistical analysis of human heart with increased informativeness,” *Acta mechanica et automatica*, vol. 12, 2018, pp. 311–315.
6. Serhii Lupenko, Nadiia Lutsyk, Oleh Yasniy, Andriy Zozulia. The Modeling and Diagnostic Features in the Computer Systems of the Heart Rhythm Analysis with the Increased Informativeness. 2019 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT). IEEE, 2019. – pp. 121–124.
7. Lytvynenko I.V. The method of segmentation of stochastic cyclic signals for the problems of their processing and modeling. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering, Oil and Gas Measurement and Testing*. 2017, Vol. 4, No. 2, pp. 93–103.
8. I. Lytvynenko. Segmentation and Statistical Processing of Geometric and Spatial Data on Self-Organized Surface Relief of Statically Deformed Aluminum Alloy. // Iaroslav Lytvynenko, Pavlo Maruschak, Sergiy Lupenko, Sergey Panin // *Applied Mechanics and Materials*, 2015, Vol. 770, pp. 288–293.
9. Lytvynenko I.V., Maruschak P.O., Lupenko S.A., Hats Yu. I, Menou A., Panin S.V. Software for Segmentation, Statistical Analysis and Modeling of Surface Ordered Structures. *Proceedings of the 10th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures*. AIP Publishing, 2016, Vol. 1785, No.1, pp. 030012–1–030012–7.
10. Литвиненко Я.В. Метод інтерполяції кубічним сплайном дискретної функції ритму циклічного сигналу із визначеною сегментною структурою. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. Хмельницький, 2017. № 3. С. 105–112.
11. Lytvynenko I.V. Method of Evaluating the Rhythm Structure of a Cyclic Signal Through Defining the Additional Countdowns of the Discrete Function of Rhythm. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering, Oil and Gas Measurement and Testing*. 2018, Vol. 5, No. 1, pp. 32–38.
12. Lytvynenko I., Horkunenko A., Kuchvara O., Palaniza Y. Methods of processing cyclic signals in automated cardiologic complexes. *Proceedings of the 1st International Workshop on Information–Communication Technologies & Embedded Systems, (ICT&ES-2019)*, Mykolaiv, November 13-14, 2019, Ukraine, 2019. P. 116–127.

## REFERENCES

1. S. Lupenko. Mathematical modeling of cyclic signals of the heart, taking into account stochasticity of their rhythm and morphological structure. // *Proceedings of the All-Ukrainian Scientific Conference of TDTU. Ternopil 2009*, P. 96.
2. S. Lupenko, A. Sverstiuk, N. Lutsik, N. Stadnik, A. Zozulya A. Conditional cyclic random process as a mathematical model of oscillatory signals and processes with double stochasticity. *Printing and publishing. Printing and Publishing, No.1 (71) 2016. Lviv, 2016. p. 147-159.*
3. Ya.V. Litvinenko, S.A. Lupenko, A.S. Sveryuk. Software for processing and simulation of synchronously recorded cardiac signals using models and methods of the theory of cyclic functional relations. *Bulletin of Khmelnytsky National University*. 2009. №5. S. 80-87.
4. Lutsik NS, Litvinenko YV, Lupenko SA, Zozulya AM Software complex for morphological and heart rate analysis with high informativeness. *Journal of Vinnitsa National Technical University "Information Technologies and Computer Engineering"*. Vinnitsa, 2016. №1 (35). Pp. 13–22.

5. S. Lupenko, N. Lutsyk, O. Yasniy and Ł. Sobaszek, "Statistical analysis of the human heart with increased informativeness," Acta mechanica et automatica, vol. 12, 2018, pp. 311–315.
6. Serhii Lupenko, Nadiia Lutsyk, Oleh Yasniy, Andriy Zozulia The Modeling and Diagnostic Features in Computer Systems of Heart Rhythm Analysis with Increased Informativeness. 2019 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT). IEEE, 2019. – pp. 121–124.
7. Lytvynenko I.V. The method of segmentation of stochastic cyclic signals for the problems of their processing and modeling. Journal of Hydrocarbon Power Engineering, Oil and Gas Measurement and Testing. 2017, Vol. 4, No. 3 2, pp. 93–103.
8. I. Lytvynenko. Segmentation and Statistical Processing of Geometric and Spatial Data on Self-Organized Surface Relief of Statically Deformed Aluminum Alloy. // Iaroslav Lytvynenko, Pavlo Maruschak, Sergiy Lupenko, Sergey Panin // Applied Mechanics and Materials, 2015, Vol. 770, p. 288–293.
9. Lytvynenko I.V., Maruschak P.O., Lupenko S.A., Hats Yu. I, Menou A., Panin S.V. Software for Segmentation, Statistical Analysis and Modeling of Surface Ordered Structures. Proceedings of the 10th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures. AIP Publishing, 2016, Vol. 1785, No.1, pp. 030012–1–030012–7.
10. Litvinenko Ya.V. A method of interpolating a cubic spline of a discrete rhythm function of a cyclic signal with a defined segmental structure. Measuring and computing technology in technological processes. Khmelnytsky, 2017. № 3. P. 105–112.
11. Lytvynenko I.V. Method of Evaluating the Rhythm Structure of a Cyclic Signal Through Defining the Additional Countdowns of the Discrete Function of Rhythm. Journal of Hydrocarbon Power Engineering, Oil and Gas Measurement and Testing. 2018, Vol. 5, No. 1, pp. 32–38.
12. Lytvynenko I., Horkunenko A., Kuchvara O., Palaniza Y. Methods of processing cyclic signals in automated cardiodiagnostic complexes. Proceedings of the 1st International Workshop on Information-Communication Technologies & Embedded Systems, (ICT & ES-2019), Mykolaiv, November 13-14, 2019, Ukraine, 2019. P. 116–127.

*Стаття надійшла до редакції 18.11.2019.*

**Д.В. РАТОВ, В.О. ЛИФАР**

## **ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ЩІЛЬНОСТІ ПРИЛЯГАННЯ ПРИ МАТЕМАТИЧНОМУ МОДЕЛЮВАННІ РОБОЧОГО ЗАЧЕПЛЕННЯ ПРОСТОРОВИХ ПЕРЕДАЧ**

***Анотація.** У продовженні попередніх досліджень розглянуто моделювання трансмісійних механізмів з визначенням одного з найважливіших критеріїв працездатності передач – коефіцієнта щільності прилягання активних поверхонь зубів просторових передач, який характеризує напружений стан зубів у об'єктно-імітаційній моделі проектованої передачі.*

***Ключові слова:** моделювання трансмісійних механізмів, коефіцієнт щільності прилягання, модель робочої поверхні зачеплення, напружений стан зубів, об'єктно-імітаційна модель.*

**DOI: 10.35350/2409-8876-2020-18-1-39-50**

### **Вступ**

Кожна сучасна машина і механізм мають в своїй конструкції різні зубчасті механізми, які є деталями зі складним профілем. Метою інженерної діяльності є створення поліпшених конструкцій механізмів. Ця мета може бути досягнута при дотриманні певних нормативів і стандартів, в яких закладені аналіз, досвід попередніх випробувань і систематизація отриманих результатів при експериментальних дослідженнях. Даний підхід вимагає значного часу і ресурсів для проектування і випробування зубчастих механізмів.

Використання натурального моделювання в автоматизації оптимального проектування дає можливість перевести процес випробувань реально виготовлених механізмів до випробувань та аналізу імітаційної моделі, що значно зберігає матеріальні і часові ресурси на підготовку і впровадження у виробництво сучасних машин або механізмів і гарантує їх якість і надійність в процесі роботи.

Використання такої імітаційної моделі можливо при побудові адекватних математичних моделей, які відображають процес робочого зачеплення і дозволяють провести чисельний аналіз для проєктованих передач трансмісійних пристроїв.

В машинознавстві працездатність зубчастих передач прийнято оцінювати якісними показниками [1–2] – критеріями, що характеризують локально-кінематичні та гідродинамічні явища в зоні контакту зубів, а також здатність навантаження передач.

Контактні напруги, що виникають в точці дотику зубів, в кінцевому підсумку, сприяють втомного руйнування контактної поверхні зубів. Це руйнування проявляється у викрашуванні поверхонь.

## 1. Загальна постановка задачі

Метою роботи є визначення при побудові математичної моделі просторових передач одного з важливих критеріїв працездатності – коефіцієнта щільності прилягання активних поверхонь зубів передач  $K_p$  [2, 5, 6], який характеризує напружений стан зубів просторової передачі.

$$K_p = \frac{S}{S_z}, \quad (1)$$

де  $S$  – площа майданчика миттєвого контакту;  $S_z$  – площа бічної поверхні зуба просторової передачі.

Коефіцієнт  $K_p$  є, до певної міри, аналогом  $K_S$  – коефіцієнта порівняльного напруженого стану зубів передачі [2].

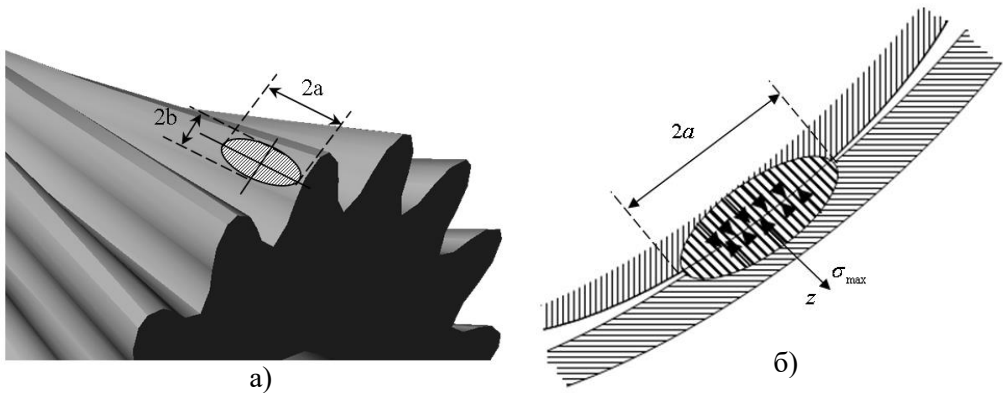


Рисунок 1 – (а) еліптична форма майданчика контакту бічної поверхні просторової передачі; (б) епора розподілу напружень по Герцу в полюсі зачеплення просторової пари

Фізичний зміст коефіцієнта щільності прилягання: збільшення (зменшення) коефіцієнта  $K_p$  означає збільшення (зменшення) навантаження на поверхні зубів і збільшення (зменшення) контактної міцності і, як наслідок, підвищення (зменшення) довговічності всієї передачі.

## 2. Математична модель визначення коефіцієнта щільності прилягання активних поверхонь зубів

У даній роботі приймається гіпотеза про те, що реальний майданчик контакту просторових передач з достатньою для вирішення практичних завдань точністю може бути представлений еліпсом (рис. 1.а). Дана гіпотеза підтверджується дослідженнями останніх років [4]. Розмір еліптичного майданчика контакту залежить від геометричних параметрів контактуючих поверхонь, модулів пружності матеріалу зубчастих коліс і нормального навантаження на зубах колеса. Нормальне навантаження  $P_n$  розподіляється по всьому майданчику еліпса (майданчику миттєвого контакту) (рис. 1.а), що має площу, яка визначається за формулою:



$$S = \pi ab, \quad (2)$$

де  $a$  – велика піввісь еліпса контакту;  $b$  – мала піввісь еліпса контакту.

Рівняння цього еліпса має вигляд

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1. \quad (3)$$

Тиск в будь-якій точці еліптичного майданчика пропорційний аплікаті  $z$  напівеліпсоїда напруженого стану (рис 1.б):

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1, \quad (4)$$

де  $a, b, c$  – півосі еліпсоїда напруженого стану.

З іншого боку, площу бічної поверхні зуба просторової передачі  $S_z$  визначимо за формулою:

$$S_z = LL_\alpha, \quad (5)$$

де  $L$  – довжина зуба (довжина утворюючої однополосного гіперболоїда),  $L_\alpha$  – довжина дуги профілю бічної поверхні зуба.

Довжина зуба  $L$  визначається за формулою (рис. 2.а)

$$L = \frac{H}{\cos\beta_n}. \quad (6)$$

Оскільки рівняння однополосного гіперболоїда обертання має вигляд  $x^2 + y^2 - tg^2\beta_n z^2 = r_1^2$ , то висота гіперболоїда (ширина вінця шестерні) буде дорівнювати:

$$H = 2 \operatorname{ctg}\beta_n \sqrt{r_t^2 - r_1^2}, \quad (7)$$

де  $H$  – ширина вінця,  $r_1$  – радіус горловини гіперболоїда,  $r_t$  – радіус гіперболоїда в торці,  $\beta_n$  – кут нахилу утворюючої до осі обертання (рис. 2.а).

Довжина дуги  $L_\alpha$  – залежить від радіуса профілю і висоти зуба (рис. 2.б)

$$L_\alpha = \rho_a \left( \arcsin\left(\frac{h_a + y_a}{\rho_a}\right) - \arcsin\left(\frac{y_a}{\rho_a}\right) \right). \quad (8)$$

Таким чином, коефіцієнт щільності прилягання може бути визначений за формулою

$$K_p = \frac{S}{S_z} = \frac{\pi abc \cos \beta_n}{2 \operatorname{ctg} \beta_n \sqrt{r_t^2 - r_1^2} \rho_a \left( \arcsin \left( \frac{h_a + y_a}{\rho_a} \right) - \arcsin \left( \frac{y_a}{\rho_a} \right) \right)} =$$

$$= \frac{\pi ab \sin \beta_n}{2 \rho_a \sqrt{r_t^2 - r_1^2} \left( \arcsin \left( \frac{h_a + y_a}{\rho_a} \right) - \arcsin \left( \frac{y_a}{\rho_a} \right) \right)} \quad (9)$$

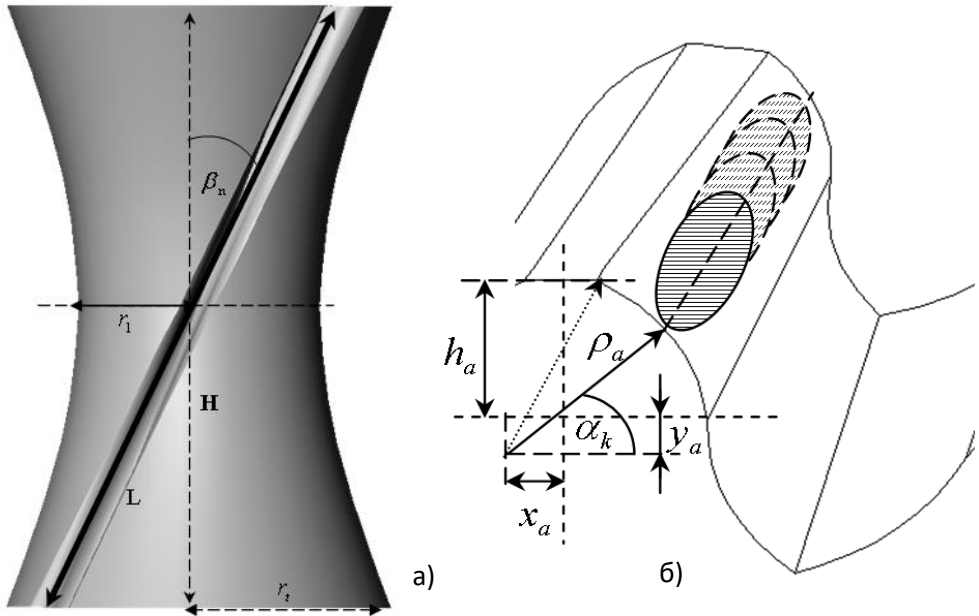


Рисунок 2 – До визначення довжини зуба  $L$  (а) і довжини дуги  $L_a$  (б)

Для знаходження великої і малої півосей еліпса миттєвого контакту (рис. 1.а) скористаємося узагальненим законом Гука і гіпотезою Вінклера [9, 11]. Для цього визначимо функцію контактних деформацій:

$$D(x, y) = B(x, y) \sigma_H(x, y), \quad (10)$$

де  $B(x, y)$  – коефіцієнт пружності сполученої пари зубів,  $\text{мм}^3 / \text{Н}$  (є величиною змінною);  $\sigma_H(x, y)$  – функція контактних напружень.

Визначимо функцію контактних напружень зубів просторових коліс. Скориставшись (4), визначимо контактні напруги в будь-якій точці всередині еліптичного контуру через максимальну (нормальну) напругу в центрі майданчика:

$$\sigma_H = P = P_{\max} \frac{z}{c} = P_{\max} \sqrt{1 - \left( \frac{x}{a} \right)^2 - \left( \frac{y}{b} \right)^2}. \quad (11)$$

Функція контактної деформації набуде вигляду:

$$D(x, y) = \frac{a^2}{2\rho} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2} = \frac{b^2}{2R} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2} . \quad (12)$$

Нормальну напругу  $P_n$  визначимо через напругу  $P$  в будь-якій внутрішній точці еліптичного контуру наступним чином:

$$P_n = \int_S P dS = \frac{P_{\max}}{c} \int_S z dS , \quad (13)$$

де обсяг напівеліпсоїдного стиснення визначимо:

$$\int_S z dS = \frac{2}{3} \pi a b c . \quad (14)$$

Підставивши значення інтеграла з (14) в (13), отримаємо вираз для визначення максимального нормального контактного напруження в центрі майданчика

$$P_{\max} = \sigma_{\max} = \frac{3P_n}{2\pi a b} = \frac{1,5P_n}{S} . \quad (15)$$

З (15) очевидно, що максимальна напруга в центрі еліптичного майданчика пружного контакту  $\sigma_{\max}$  в 1,5 раза більше середньої напруги, заданої формулою:

$$\sigma_s = \frac{P_n}{\pi a b} = \frac{P_n}{S} . \quad (16)$$

Контактна напруга не є лінійною функцією нормального навантаження  $P_n$  і з ростом  $P_n$  зростає все повільніше. Це пояснюється тим, що під дією навантаження  $P_n$  відбувається місцева пружна деформація невеликого обсягу металу в зоні контакту. В результаті цього зуби, які контактують, зближуються. Зближення відбувається так, що точки зубів, що лежать поза зоною деформації, переміщуються на деяку величину уздовж осі  $z$ . Тому зі збільшенням  $P_n$  збільшуються і  $a$ ,  $b$ , при цьому збільшується площа майданчика миттєвого контакту (2) і, отже, зменшуються контактні напруги.

Для отримання коефіцієнта  $B$  формули (10) у вигляді константи замінимо реальну епюру розподілу напружень  $\sigma_H(x, y)$  по еліптичному майданчику контакту (рис 1.6) епюрою середньої напруги  $\sigma_s$  (17), рівномірно розподіленої по майданчику контакту. Тоді (15) прийме вид:

$$\sigma_{\max} = \frac{3P_n}{2\pi a b} = \frac{3}{2} \sigma_s . \quad (17)$$

Після заміни в рівнянні (10) змінної величини коефіцієнта пружності  $B$  ( $x, y$ ) константою  $B$  рівняння набуде вигляду

$$D(x, y) = B\sigma(x, y). \quad (18)$$

Для використання функції (18) необхідно знайти вираз коефіцієнта пружності  $B$ . З цією метою спочатку скористаємося залежністю, що характеризує взаємозв'язок між пружними переміщеннями (деформаціями)  $D$  зубів і виникаючими в них напруженнями [9], а саме:

$$D_m = K_m \sigma_s^n. \quad (19)$$

де  $K_m$  – розмірний параметр, мм / МПа;  $n$  – показник ступеня, рівний 0,7 ... 0,8 [8, 10] (стосовно до точкового контакту тіл необхідно виходити зі ступеня  $n = 0,7$ ).

Стосовно до сполученої пари зубів шестерні і колеса рівняння контактних напружень, на основі узагальненого закону Гука, мають вигляд [11]

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{(\varepsilon_{zy} + \nu_1 \varepsilon_{zx}) E_1}{1 - \nu_1^2}; \\ \sigma_2 = \frac{(\varepsilon_{zy} + \nu_2 \varepsilon_{zx}) E_2}{1 - \nu_2^2}. \end{cases} \quad (20)$$

Де –  $\varepsilon_{zx} = \frac{\Delta L_{zx}}{L_x}$ ,  $\varepsilon_{zy} = \frac{\Delta L_{zy}}{L_y}$  відносні деформації;  $\Delta L_{zx}$ ,  $\Delta L_{zy}$  – абсолютні деформації;  $L_x = 2a$ ,  $L_y = 2b$  – довжини осей контактного еліпса;  $\nu_1, \nu_2$  – коефіцієнти Пуассона;  $E_1, E_2$  – модулі пружності матеріалів зубів.

У разі виконання рівності  $\Delta L_{zx} = \Delta L_{zy}$  отримуємо вираз  $\varepsilon_{zx} L_x = \varepsilon_{zy} L_y$ , виходячи з якого при  $L_x = 2a$ ,  $L_y = 2b$ ,  $\frac{a}{b} = \alpha$  ( $\alpha$  – коефіцієнт еліптичності [12]), отримаємо співвідношення:

$$\frac{\varepsilon_{zy}}{\varepsilon_{zx}} = \frac{L_x}{L_y} = \frac{2a}{2b} = \frac{a}{b} = \alpha; \quad \varepsilon_{zy} = \alpha \varepsilon_{zx}.$$

З огляду на те, що  $\Delta L_{zx} = \frac{a^2}{2\rho}$ , то  $\varepsilon_{zy} = \varepsilon_{zx} \alpha = \frac{\Delta L_{zx}}{L_x} \alpha = \frac{a^2}{2\rho 2a} \alpha = \frac{a}{4\rho} \alpha$ ,  $\rho = \frac{\rho_a \rho_f}{\rho_a + \rho_f}$  – наведений радіус кривизни бічних профілів зубів.

Після підстановки правої частини залежності  $\varepsilon_{zy} = \alpha \varepsilon_{zx} = \frac{a}{4\rho} \alpha$  в рівняння (20) вони приймуть вигляд:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{\varepsilon_{zx}(\alpha + \nu_1)E_1}{1 - \nu_1^2} = \frac{a(\alpha + \nu_1)E_1}{4\rho(1 - \nu_1^2)}; \\ \sigma_2 = \frac{\varepsilon_{zx}(\alpha + \nu_2)E_2}{1 - \nu_2^2} = \frac{a(\alpha + \nu_2)E_2}{4\rho(1 - \nu_2^2)}. \end{cases} \quad (21)$$

На основі залежності (19) при  $n = 0,7$  і виразів (21) отримаємо два рівняння пружних переміщень сполученої пари зубів:

$$\begin{cases} D_1 = K_1 \sigma_1^{0,7} = K_1 \left( \frac{a(\alpha + \nu_1)E_1}{4\rho(1 - \nu_1^2)} \right)^{0,7} \\ D_2 = K_2 \sigma_2^{0,7} = K_2 \left( \frac{a(\alpha + \nu_2)E_2}{4\rho(1 - \nu_2^2)} \right)^{0,7}. \end{cases} \quad (22)$$

З (22), враховуючи, що  $D = \Delta L_{zx} = \frac{a^2}{2\rho}$ , отримаємо залежності розмірних параметрів:

$$\begin{cases} K_1 = D_1 \left( \frac{4\rho}{a} \frac{1 - \nu_1^2}{(\alpha + \nu_1)E_1} \right)^{0,7} = \frac{a^2}{2\rho} \left( \frac{4\rho}{a} \right)^{0,7} \left( \frac{1 - \nu_1^2}{(\alpha + \nu_1)E_1} \right)^{0,7} = 2^{0,4} \frac{a^{1,3}}{\rho^{0,3}} \left( \frac{1 - \nu_1^2}{(\alpha + \nu_1)E_1} \right)^{0,7} \\ K_2 = D_2 \left( \frac{4\rho}{a} \frac{1 - \nu_2^2}{(\alpha + \nu_2)E_2} \right)^{0,7} = \frac{a^2}{2\rho} \left( \frac{4\rho}{a} \right)^{0,7} \left( \frac{1 - \nu_2^2}{(\alpha + \nu_2)E_2} \right)^{0,7} = 2^{0,4} \frac{a^{1,3}}{\rho^{0,3}} \left( \frac{1 - \nu_2^2}{(\alpha + \nu_2)E_2} \right)^{0,7}. \end{cases} \quad (23)$$

Далі, виходячи із залежності (16) і виразів (23), знайдемо рівняння контактної пружності зубів шестерні і колеса:

$$\begin{cases} \delta_1 = \frac{D_1}{P_n} = \frac{K_1 \sigma_1^{0,7}}{P_n} = \frac{2^{0,4} a^{1,3}}{\rho^{0,3} P_n} \left( \frac{1 - \nu_1^2}{(\alpha + \nu_1)E_1} \right)^{0,7} \left( \frac{P_n \alpha}{\pi a^2} \right)^{0,7} = \frac{2^{0,4}}{\pi^{0,7} a^{0,1} (\rho P_n)^{0,3}} \left( \frac{\alpha(1 - \nu_1^2)}{(\alpha + \nu_1)E_1} \right)^{0,7} \\ \delta_2 = \frac{D_2}{P_n} = \frac{K_2 \sigma_2^{0,7}}{P_n} = \frac{2^{0,4} a^{1,3}}{\rho^{0,3} P_n} \left( \frac{1 - \nu_2^2}{(\alpha + \nu_2)E_2} \right)^{0,7} \left( \frac{P_n \alpha}{\pi a^2} \right)^{0,7} = \frac{2^{0,4}}{\pi^{0,7} a^{0,1} (\rho P_n)^{0,3}} \left( \frac{\alpha(1 - \nu_2^2)}{(\alpha + \nu_2)E_2} \right)^{0,7}. \end{cases} \quad (24)$$

З урахуванням розміру еліптичного майданчика контакту (2), що дорівнює  $S = \pi ab$ , і залежності (24) визначимо вираз коефіцієнта пружності:

$$\begin{aligned} B &= S(\delta_1 + \delta_2) = \pi ab(\delta_1 + \delta_2) = \pi \frac{a^2}{\alpha} (\delta_1 + \delta_2) = \\ &= \pi \frac{a^2}{\alpha} \cdot \frac{2^{0,8}}{\pi^{0,7} a^{0,1} (\rho P_n)^{0,3}} \left( \left( \frac{\alpha(1 - \nu_1^2)}{(\alpha + \nu_1)E_1} \right)^{0,7} + \left( \frac{\alpha(1 - \nu_2^2)}{(\alpha + \nu_2)E_2} \right)^{0,7} \right) = \\ &= \frac{2^{0,8} a^{1,9} \pi^{0,7}}{(\alpha \rho P_n)^{0,3}} \left( \left( \frac{1 - \nu_1^2}{(\alpha + \nu_1)E_1} \right)^{0,7} + \left( \frac{1 - \nu_2^2}{(\alpha + \nu_2)E_2} \right)^{0,7} \right). \end{aligned} \quad (25)$$

Відповідно до виразу (25) функція (18) контактної деформації зубів прийме остаточний вигляд

$$D(x, y) = \frac{2^{0,8} a^{1,9} \pi^{0,7}}{(\alpha \cdot \rho \cdot P_n)^{0,3}} \left( \left( \frac{1 - \nu_1^2}{(\alpha + \nu_1) E_1} \right)^{0,7} + \left( \frac{1 - \nu_2^2}{(\alpha + \nu_2) E_2} \right)^{0,7} \right) \sigma(x, y) \quad (26)$$

Виходячи з (13) і (26), беручи до уваги (12), визначимо рівняння, що характеризує напружено-деформований стан розглянутої сполученої пари зубів:

$$\begin{aligned} BP_n &= B \int_S P dS = B \int_{-b-a}^b \int_{-a}^a \sigma(x, y) dx dy = \\ &= \frac{2^{0,8} a^{1,9} \pi^{0,7} P_n}{(\alpha \cdot \rho \cdot P_n)^{0,3}} \left( \left( \frac{1 - \nu_1^2}{(\alpha + \nu_1) E_1} \right)^{0,7} + \left( \frac{1 - \nu_2^2}{(\alpha + \nu_2) E_2} \right)^{0,7} \right) = \\ &= \frac{a^2}{2\rho} \int_{-b-a}^b \int_{-a}^a \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2} dx dy = \frac{a^2}{2\rho} \cdot \frac{2}{3} \pi ab = \frac{\pi a^3 b}{3\rho} = \frac{\pi a^4}{3\alpha\rho}. \quad (27) \end{aligned}$$

Перетворимо дане рівняння до виду

$$a^{2,1} = 2^{0,8} \cdot 3 \cdot \frac{(\alpha \rho P_n)^{0,7}}{\pi^{0,3}} \left( \left( \frac{1 - \nu_1^2}{(\alpha + \nu_1) E_1} \right)^{0,7} + \left( \frac{1 - \nu_2^2}{(\alpha + \nu_2) E_2} \right)^{0,7} \right). \quad (28)$$

Зводячи ліву і праву частини останньої рівності в ступінь 10/21, отримаємо величину малої півосі еліпса

$$a = 1,8658 \sqrt[3]{\left( \left( \frac{\alpha \rho P_n (1 - \nu_1^2)}{(\alpha + \nu_1) E_1} \right)^{0,7} + \left( \frac{\alpha \rho P_n (1 - \nu_2^2)}{(\alpha + \nu_2) E_2} \right)^{0,7} \right)^{\frac{10}{7}}}. \quad (29)$$

На підставі залежності (29) представимо вираз для великої півосі еліптичного майданчика контакту

$$b = \frac{a}{\alpha} = \frac{1,8658}{\alpha} \sqrt[3]{\left( \left( \frac{\alpha \rho P_n (1 - \nu_1^2)}{(\alpha + \nu_1) E_1} \right)^{0,7} + \left( \frac{\alpha \rho P_n (1 - \nu_2^2)}{(\alpha + \nu_2) E_2} \right)^{0,7} \right)^{\frac{10}{7}}}. \quad (30)$$

Тоді (2) перетвориться до виду:

$$S = \pi \frac{3,478}{\alpha} \sqrt[3]{\left( \left( \frac{\alpha \rho P_n (1 - \nu_1^2)}{(\alpha + \nu_1) E_1} \right)^{0,7} + \left( \frac{\alpha \rho P_n (1 - \nu_2^2)}{(\alpha + \nu_2) E_2} \right)^{0,7} \right)^{\frac{20}{7}}}. \quad (31)$$

І остаточно коефіцієнт щільності прилягання (9), з урахуванням (31), набуде вигляду:

$$K_p = \frac{S}{S_z} = \frac{\pi ab \sin \beta_n}{2\rho_a \sqrt{r_t^2 - r_1^2} \left( \arcsin \left( \frac{h_a + y_a}{\rho_a} \right) - \arcsin \left( \frac{y_a}{\rho_a} \right) \right)} =$$

$$= \frac{3,478 \cdot \pi \sin \beta_n \sqrt[3]{\left( \left( \frac{\alpha \rho P_n (1 - \nu_1^2)}{(\alpha + \nu_1) E_1} \right)^{0,7} + \left( \frac{\alpha \rho P_n (1 - \nu_2^2)}{(\alpha + \nu_2) E_2} \right)^{0,7} \right)^{\frac{20}{7}}}}{\alpha \rho_a \sqrt{r_t^2 - r_1^2} \left( \arcsin \left( \frac{h_a + y_a}{\rho_a} \right) - \arcsin \left( \frac{y_a}{\rho_a} \right) \right)} . \quad (32)$$

На практиці при розрахунках передач маємо  $\nu_1 = \nu_2 = \nu = 0,3$ ,  $E_1 = E_2 = E$ , в зв'язку з чим, вираз (32) буде спрощено:

$$K_p = \frac{6,73 \cdot \pi \sin \beta_n \sqrt[3]{\left( \frac{\alpha \rho P_n (1 - \nu^2)}{(\alpha + \nu) E} \right)^2}}{\alpha \rho_a \sqrt{r_t^2 - r_1^2} \left( \arcsin \left( \frac{h_a + y_a}{\rho_a} \right) - \arcsin \left( \frac{y_a}{\rho_a} \right) \right)} . \quad (33)$$

### 3. Результати досліджень

Проведемо дослідження характеру впливу параметрів передачі на коефіцієнт щільності прилягання (33) (рис. 3–6).

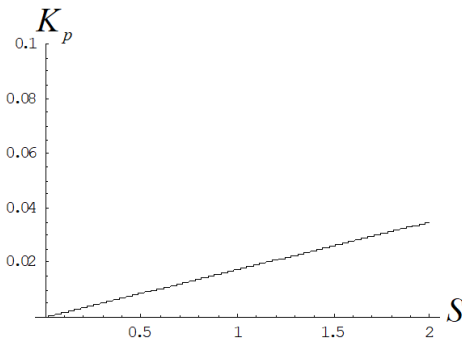


Рисунок 3 – Залежність  $K_p$  – коефіцієнта щільності прилягання від  $S$  – площі контакту бічної поверхні зуба

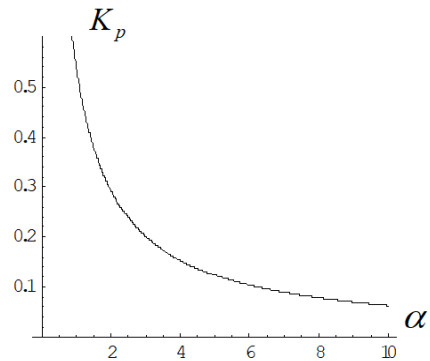


Рисунок 4 – Залежність  $K_p$  – коефіцієнта щільності прилягання від  $\alpha$  – коефіцієнта еліптичності

З рис. 3–6 видно, що при збільшенні  $P_n$  – нормальної напруги в номінальній точці контакту або збільшенні  $S$  – площі майданчика миттєвого контакту (що може бути наслідком зростання  $P_n$ ) значення коефіцієнта щільності прилягання збільшується, а тому збільшується і несуча здатність,

поліпшуються умови утворення масляного слою, зменшується тертя і збільшується к.к.д. передачі, зменшується контактна напруга.

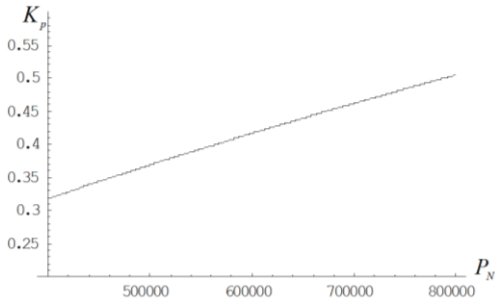


Рисунок 5 – Залежність  $K_p$  – коефіцієнта щільності прилягання від  $P_n$  – нормальної напруги в номінальній точці контакту

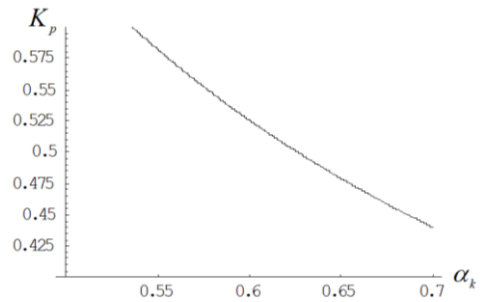


Рисунок 6 – Залежність  $K_p$  – коефіцієнта щільності прилягання від  $\alpha_k$  – кута тиску в номінальній точці контакту

Тому справедливо можна зробити висновок, що несуча здатність зубчастої передачі знаходиться в прямій залежності від коефіцієнта щільності прилягання, і тому його слід розглядати як критерій для вибору параметрів зубчастого вінця, при побудові об'єктно-імітаційної моделі проектованої передачі.

## Висновки

1. У математичній моделі проектування просторових передач розроблена модель розрахунку коефіцієнта щільності прилягання бічних поверхонь зубів, який характеризує напружений стан зубів просторової передачі і дозволяє оцінити здатність навантаження зубів і контактну міцність і, як наслідок, довговічність всієї передачі.

2. Виконана імплементація і проведено дослідження характеру впливу параметрів передачі на коефіцієнт щільності прилягання просторових передач.

Отримана математична модель розрахунку коефіцієнта щільності прилягання поверхонь зубів сприяє розробці програмного модуля і компонент системи моделювання, орієнтованих на створення імітаційно-об'єктних моделей просторових передач в робочому зачепленні і на візуалізацію результатів моделювання. Використання такої системи моделювання зберігає матеріальні і часові ресурси і прискорює впровадження у виробництво просторових передач з підвищеною контактною міцністю в різних трансмісійних пристроях, приводах ковальсько-пресового, збагачувального, транспортного та інших видів обладнання.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ратов Д.В., Балицька Т.Ю. Чисельний багатокритеріальний синтез передач Новікова ДЛЗ. // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля – 2007. – № 12 (118). – Частина 1. – С. 52–56.



2. Грибанов В.М. Теория гиперболюидных зубчатых передач. – Луганск: Изд-во Восточноукр. нац. ун-та им. В. Даля, 2003. – 272 с.
3. Новиков М.Л. Зубчатые передачи с новым зацеплением. – М: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1958. – 186 с.
4. Проектирование зубчатых конических и гипоидных передач. – Инструкционные материалы фирмы “Глиссон” (США). – М. – 2001. – 274 с.
5. Павленко А.В., Федякин Р.В., Чесноков В.А. Зубчатые передачи с зацеплением Новикова. – Киев: Техніка, 1978. – 144 с.
6. Сопротивление материалов: Учебник для вузов / Под общ. ред. Г.С. Писаренко. – Киев: Вища Школа. Головное изд-во, 1979. – 696 с.
7. Попов А.П., Селивановский В.Ю. Новый метод расчета контактных напряжений в зацеплении Новикова // Вестник национального технического университета «ХПИ». – 2003. – №8. – С. 82–87.
8. Левина З.М., Решетов Д.Н. Контактная жесткость машин. – М.: Машиностроение, 1971. – 264 с.
9. Попов А.П. Контактная прочность зубчатых механизмов. – Николаев: Изд-во НУК, 2008. – 580 с.
10. Рыжов Э.В. Контактная жесткость деталей машин. ЦНИИТМАШ.– М., 1946.
11. Андреев А.В. Расчет деталей при сложном напряженном состоянии. – М.: Машиностроение, 1981. – 215 с.
12. Шишов В.П., Носко П.Л., Величко Н.И., Карпов А.П. Высоконагруженные винтовые зубчатые передачи. – Луганск: изд-во ВНУ им. В. Даля, 2009. – 240 с.

## REFERENCES

1. Ratov D.V., Balytska T.YU. Numerical multiobjective synthesis Novikov gears DLZ. // Journal of East Ukrainian National University of Vladimir Dal – 2007. – № 12 (118). – Part 1 – p. 52–56.
2. Griбанov V.M. Theory hyperboloid gear. – Lugansk: Publ Vostochnoukr. nat. Zap them. Dal, 2003. – 272 p.
3. Novikov M.L. Gears with the new cluting. – M: VVIA them. NOT. Zhukovskogo, 1958. – 186 with.
4. Design of bevel and hypoid gears. – instructional "Gleason" company materials (USA). – М. – 2001. – 274 s.
5. Pavlenko A.V., Fedyakin R.V., Chesnokov V.A. Gears with gearing Novikova. – Kiev Tehnika, 1978. – 144 with.
6. Strength of materials: Textbook for high schools / under total. Ed. G.S. Pisarenko. – Kiev: Vishcha School. Head Publishing House, 1979. – 696 s.
7. A.P. Popov, V.Y. Selivanovsky The new method of calculation of contact stresses in engagement Novikov // Bulletin of National Technical University "KPI". – 2003. – №8. – from. 82–87.
8. Levin Z.M., Rechetov D.N. Contact rigidity machines. – М.: Engineering, 1971.– 264 p.
9. Popov A.P. Contact strength of gear mechanisms. – Nikolaev: Publishing House of the NAA, 2008. – 580 p.
10. Ryzhov E.V. Contact stiffness of machine parts. TSNITMASH. – Moscow, 1946.
11. Andreev A.V. Calculation of parts under complex stress state. – М.: Engineering, 1981. – 215 p.
12. SHishov V.P., Velichko N.I., Karpov A.P. Highload helical gears. – Lugansk: publ EUNU. Dal, 2009. – 240 p.

*Стаття надійшла до редакції 29.10.2019.*

**О.О. КРЯЖИЧ, О.В. КОВАЛЕНКО**

## **РЕЛЕВАНТНІСТЬ ІНФОРМАЦІЇ У ЧАСІ ПРИ ЗДІЙСНЕННІ ПОШУКОВОГО ЗАПИТУ**

***Анотація.** В роботі наведений огляд питання забезпечення релевантності інформації в часі при здійсненні пошукового запиту. Проаналізований процес сприйняття інформації людиною у вигляді певних полів, що представляється за допомогою математичних функцій. Визначено, що функцією моделі живучої системи буде – точно визначати набір компонентів, необхідних для виконання закладених у систему функцій у конкретному часовому інтервалі. Для живучої інформаційної системи перехід між моментами «успіх/невдача» буде залежати від програмних, апаратних і інформаційних засобів. Зроблені висновки щодо практичного застосування.*

***Ключові слова:** запит, інформація, складна система, живучість, аналіз.*

**DOI: 10.35350/2409-8876-2020-18-1-51-61**

### **Вступ**

Формування запиту на пошук інформації [1] та відповідь на запит [2] – це, фактично, представлення опису [3] та актуальної інформації про стан [4] деякої складної системи [5]. Так, довкілля [6] представляє собою складну систему, яка складається з живих і неживих компонентів [7]. Підприємство – організаційна, виробнича та фінансова складна система [8]. Людину, або людський організм, теж можна представити як складну систему [3]. Перетин таких систем збільшує перелік компонентів, процеси взаємодії, зворотні зв'язки – ускладнює саму систему, підвищуючи її вимоги до живучості, як можливості виконувати свої функції, адаптуватися до змін та протидіяти зовнішнім впливам з деякою допустимою втратою функціональності [9–10].

В теорії прийняття рішень існує поняття невизначеності – ситуації, коли неможливо оцінити ймовірність потенційних результатів. Це має місце тоді, коли чинники, що потребують обліку, настільки нові і складні, що відносно них неможливо отримати достатньо релевантної інформації і виникає ситуація, коли ймовірність певного наслідку неможливо передбачити з достатнім ступенем достовірності. Інакше це можна описати так: обставини місця і часу настільки мінливі, що важко оцінити стан ситуації, яка виникла та/або розвивається.

Отримання інформації про якийсь складний об'єкт вимагає одночасно з пошуком певного коригування отримуваних даних щодо стану цього об'єкта у часі. Актуальність роботи полягає в тому, що здійснення пошукового запиту, особливо, якщо цей запит стосується процесу управління для забезпечення живучості системи, потребує постійного коригування

інформації, її оновлення, додавання уточнюючих питань для отримання релевантної інформації.

Мета роботи – проведення аналізу шляхів забезпечення релевантності інформації у часі при здійсненні пошукового запиту.

Зазначена мета розкривається за допомогою наступних задач:

– проаналізувати значення релевантної інформації для забезпечення живучості складної системи, тобто, виконання нею всіх закладених функцій в достатньому для безперебійної роботи обсязі;

– запропонувати деякі можливі шляхи для забезпечення релевантної інформації при оптимізації управління складною системою.

## 1. Аналіз літературних джерел за темою дослідження

За В.М. Глушковым [4], інформаційною або інформаційно-пошуковою системою (ІПС) є сукупність мовно-алгоритмічних і технічних засобів, призначених для зберігання, пошуку та видачі необхідної інформації. Бувають документальними – для видачі запитів з технічних документів (статей, патентів, звітів і т. п.), та фактографічними, призначеними для видачі відповідей на інформаційні запити щодо якихось фактів. Інформаційно-довідковою системою (ІДС) є система реєстрації, переробки і зберігання інформації, яка призначена для забезпечення користувачів інформацією довідкового змісту [11–12].

Традиційно [13] ІПС використовують для автоматизації каталогів і індексів з 50-х років минулого сторіччя. У теперішній час інформаційні пошукові системи представлені у мережі Інтернет. Серед них можна вказати всесвітньо відомий «Google» (1998 р., Стенфордський університет), а в Україні – розробку Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» «Мета» (1998 р.) [14]. Також активно створюються і розвиваються наукові пошукові сервери – Гугл Академія або Гугл Сколар (Scholar.google.com), електронний навігатор наукових ресурсів SciGuide (prometeus.nsc.ru/sciguide/), STN International (Scientific and Technical Information Network) [15] та ін.

Здійснення пошуку – це звернення до певної системи довідок. До інформаційно-довідкових систем (ІДС) відносять різноманітні електронні паспорти (промислових об'єктів, ризиків регіону, області, країни, надзвичайних ситуацій і т. п.) [16]; бібліотечні системи і каталоги різного спрямування [17]; різноманітні електронні довідники і енциклопедії або інтерактивні табло в торгових центрах [18]. Відома Інтернет-енциклопедія Вікіпедія є також ІДС [19].

Аналізуючи ІПС та ІДС, які, по суті, призначені для поєднання в єдине ціле та управління змістовно зв'язаними елементами інформаційного простору, слід зупинитися на питаннях забезпечення повноти, несуперечності, своєчасності інформації, яка після обробки повинна залишитися релевантною, а сама інформаційна система – живучою [20].

І тут виникає основне питання – як на запит отримати саме релевантну інформацію, а не набір даних, які частково або повністю вже не відповідають стану об'єкта, щодо якого робиться запит, тобто, як подолати невизначеність щодо отримання релевантної інформації на пошуковий запит?

Стикаючись з невизначеністю, користувач ПС та ІДС може використовувати дві основні можливості. По-перше, спробувати отримати додаткову інформацію і ще раз проаналізувати проблему. Цим часто вдається зменшити новизну і складність питання, що виникло. Користувач поєднує цю додаткову інформацію та аналіз з накопиченим досвідом, здатністю до судження або інтуїцією, щоб надати ряду результатів, отриманих з ПС та ІДС, суб'єктивну або передбачувану імовірність.

Друга можливість – діяти в точній відповідності з минулим досвідом, судженнями або інтуїцією і зробити припущення про імовірність подій з використанням обмеженої інформації, що отримана за допомогою ІДС та ПС. Це необхідно, коли не вистачає часу на збір додаткової інформації або витрати на неї надто високі. Такі часові і інформаційні обмеження можуть призвести до отримання великого відсотку нерелевантної інформації.

Хід часу обумовлює зміни ситуації в динамічних системах. Якщо вони значні, ситуація може змінитися настільки, що наявна інформація не відповідатиме критеріям. Тому слід знову досягти якоїсь межі у відборі, обробці і видачі користувачу тієї інформації, яка є релевантною і точною. Часто це є важким завданням, оскільки час між отриманням інформації з якогось джерела (датчика) і початком дії, коли є запит на цю інформацію, занадто великий. Крім того, інформація, як правило, користувачу потрібна для прийняття якогось рішення, і це рішення слід прийняти швидко, щоб бажана дія зберегла свою мету. Тому врахування фактору часу іноді змушує користувачів спиратися на судження або навіть на інтуїцію, тоді як в нормальних обставинах вони воліли б раціонального аналізу на основі здійсненого через ПС та ІДС пошуку.

Подібним чином слід враховувати ймовірність випередження інформацією свого часу. Це стосується здебільшого прогнозних даних, які є передбаченням майбутнього стану предмету або події на основі минулих або теперішніх даних, які надані користувачеві без відповідного пояснення, що призводить до неточностей і помилок.

## **2. Значення релевантної інформації для забезпечення живучості системи**

Складна система є великою кількістю об'єднаних в ній компонентів [46], кожен з яких у найпростішому випадку можна описати з двох позицій – функціонування (дії) або помилки (бездіяльності). Коли набір операційних компонентів і набір компонентів помилки визначений, можна позначити статус системи. Проблема полягає в тому, щоб обчислити ймовірність використання компонентів системи, які забезпечують живучість системи – функціонування на деякому відрізку часу, що не призводить до виникнення помилок або швидкого їх виправлення у разі виникнення. У випадку ПС та ІДС це можна представити як забезпечення релевантності інформації в часі. Рішення задачі уникнення помилок у часі і дозволить говорити про систему як про життєздатну.

Академік В.М. Глушков конкретизував вимоги, що пред'являються до обчислювальних систем управління, виділивши сім принципів: автоматизація документообігу, одноразове введення даних, динамічна цілісність, системна єдність, типовість (універсальність і уніфікація), модульність. У зазначеній праці наведений аналіз процесу сприйняття інформації людиною у вигляді

певних полів, що представляється за допомогою математичних функцій  $y = f(x, t)$ , де  $t$  – час,  $x$  – точка, в якій вимірюється поле,  $y$  – розмір поля в цій точці. При зміні поля у фіксованій точці  $x=a$  функція  $f(x, t)$  вироджується в функцію часу  $y(t) = f(a, t)$ . У більшості випадків всі скалярні величини, які входять до співвідношення  $y = f(x, t)$ , можуть приймати безперервний ряд значень, з огляду на це інформація, представлена таким чином, буде безперервною. В іншому випадку, без необхідних перетворень, точність інформації стає обмеженою, в тому числі і обмеженою у часі, що призводить до її нерелевантності.

Оскільки людина сприймає інформацію в дискретному вигляді, будь-яка інформація може бути апроксимована дискретною інформацією з встановленим ступенем точності. Сучасні вимоги до технологій обробки інформації породили поняття гарантоздатності як гарантії релевантності інформації під час її обробки. Гарантоздатність насамперед пов'язана з достовірністю одержуваної з обчислювальної системи інформації і пов'язана з нормальною (штатною) її роботою, незважаючи на наявність допустимих внутрішніх і зовнішніх збурень, тобто система має певний запас стійкості (стабільності). Однак слід враховувати, що достовірність одержуваної інформації безпосередньо залежить від часу здійснення подій. Це особливо актуально для ІДС та ІПС, призначених для роботи в межах систем підтримки прийняття рішень в умовах надзвичайних ситуацій (техногенні катастрофи, лісові пожежі, стихійні лиха тощо), тому час не можна розглядати як несуттєвий фактор або деяку абстрактність.

Як зазначається у праці Ст. Біра [21], модель життєздатної системи повинна бути моделлю організаційної структури будь-якого життєздатного організму або автономної системи. Функціонування життєздатного організму можна описати в просторі і в часі, виходячи з чого, можна зробити висновок, що параметр часу для моделі життєздатної системи є базовим, а інформація – релевантною, оскільки повинна сприяти виконанню функцій системи у часі, як цьому сприяє ефективна організаційна структура протягом життєвого циклу підприємства.

Подібні питання досліджуються і у монографії М.П. Бусленка [22], одного з розробників загальнодержавної автоматизованої системи (ЗДАС), що виконувалася під керівництвом В.М. Глушкова [23]. При аналізі показників, що характеризують властивості складних систем, серед яких розглядаються продуктивність, надійність, перешкодозахищеність, якість управління і т. п., зазначено, що «на практиці часто робляться спроби (як правило, невдалі) використовувати для оцінки надійності складних систем показники, запозичені з теорії надійності «простих» систем. Такими показниками звичайно служать «середній час безвідмовної роботи системи» (середній час, протягом якого всі елементи системи перебувають у робочому стані), «ймовірність безвідмовної роботи системи протягом заданого інтервалу часу»... Ці показники враховують лише сам факт появи чи відсутності відмов елементів системи і не дають, щиро кажучи, ніякого уявлення про вплив відмов на кінцевий ефект функціонування системи» [22]. В цій же роботі аналізуються різноманітні відхилення системи в період часу  $t$ , де час розглядається як деяка статична величина, при якій система змінила

свої базові показники, виходячи з чого, можна зробити висновок, що функціонування системи представлено не як вектор розвитку подій, а як точка заміни одних параметрів іншими.

Сучасні моделі, методи і алгоритми, використовувані в системах обробки інформації, максимально наближені до реальних систем, для управління якими вони призначені. Пошук показників, що дозволяють оцінити їх ефективність, призвів до виникнення поняття гарантоздатності, як синтетичного поняття, яке об'єднує наступні показники:

- готовність до правильного обслуговування;
- безвідмовність – безперервність (сталість) правильного обслуговування;
- функціональна безпека, що забезпечує відсутність катастрофічних наслідків для людей і навколишнього середовища;
- цілісність – відсутність некоректних змін системи;
- обслуговуваність, здатність піддаватися модифікаціям і ремонту або автоматичній заміні компонент системи, які відмовили, а також стійкість роботи.

Показник гарантоздатності доповнюється вимогою безпеки системи, тобто можливості протистояти зовнішнім загрозам і, перш за все, несанкціонованому проникненню в систему. Хоча все ж, за аналогією [22], система розглядається без врахування параметру часу, проте деякі функції досліджуються в динаміці виконання. А от в роботі Дж. І. Анселла і М. Дж. Філіпса поняття гарантоздатності не використовується, а діяльність складної системи досліджується за параметром надійності. При цьому надійність представлена не як деяка ефемерна категорія, а як показник роботи системи на певному відрізку часу. В більш сучасній роботі українських вчених А.Г. Додонова і Д.В. Ланде [20] одне з центральних питань присвячене моделюванню інформаційних потоків саме у часі. Інформаційна динаміка розглядається як процес виникнення і зникнення окремих тематик протягом часового відрізка, досліджується фактор запізнювання і ймовірність появи оновленої інформації незалежно від істотної зміни подій. Відповідно, на цій основі висуваються певні теорії побудови інформаційних технологій довідкових та пошукових систем для виконання функцій і задач підтримки прийняття рішень в різних ситуаціях.

Викладене дає можливість прослідкувати зв'язок гарантоздатності системи та результат отримання релевантної інформації. Так, пристрій або система можуть бути описані як сукупність підсистем або компонентів. Система працює успішно, якщо всі її компоненти працюють успішно (без помилок), але в деяких випадках можлива невдала робота, коли сукупність компонентів підібрана невдало. У цьому випадку можна зазначити:

- а) для підбору компонентів була використана нерелевантна інформація;
- б) в результаті помилок буде отримана нерелевантна інформація.

Тут слід нагадати, що система може бути представлена як сукупність *n*-впізнаваних компонентів, що виконують деякі функції, і існує, як вже було зазначено раніше, два операційних моменти функціонування на часовому відрізку – успіх/невдача. І у цьому випадку функцією моделі живучої системи буде – точно визначати набір компонентів, необхідних для виконання закладених у систему функцій у конкретному часовому інтервалі. Для живучої інформаційної системи перехід між моментами «успіх/невдача» буде залежати від програмних, апаратних і інформаційних засобів. Саме ці три

складові і їх співвідношення і впливатимуть на кінцеву релевантність інформації в окремій точці часового відрізка.

### **3. Забезпечення релевантності інформації при оптимізації системи управління**

За сучасного розвитку засобів обчислювальної техніки питання раціонального використання ресурсів інформаційної системи повинно було б відійти на другий план. Проте черговість виконання завдань при використанні кластерних обчислень, виконання операцій за допомогою хмарних технологій, використання Wi-Fi для роботи на відстані, підключення віддалених експертів та спеціалістів, що працюють на різній за характеристиками та технологіями обчислювальної техніці для вирішення окремих задач, знову підняли питання оптимізації для отримання релевантної інформації. Так, наприклад, учасники антитерористичної операції на Сході України потребували планшетів, обладнаних програмами, що дозволяють, з одного боку, отримувати дані з безпілотних літальних апаратів, знімки дистанційного зондування Землі, обробляти їх, а з іншого – передавати оброблені дані іншим фахівцям і службам з певним рівнем надійності до захисту даних та гарантованою можливістю зчитування цих даних на техніці, що є у тих фахівців. Такі ж самі задачі стоять і перед фахівцями Державної служби України з надзвичайних ситуацій, спеціалістів медицини катастроф та багатьох інших.

Можливість підвищення живучості [24] інформаційної технології з врахуванням балансу програмних та апаратних засобів ґрунтується на тому, що частота використання команд, даних, адрес, операційних пристроїв, каналів зв'язку, місткостей пам'яті і т. д. розподілена по діапазону можливих значень украй нерівномірно. Тому реальна живучість інформаційної технології визначається найбільш вузьким місцем в системі, тобто, може бути описана за законом Амдала. Одним з підходів для виявлення «вузьких місць» в інформаційній технології та здійснення на цій основі оптимізації технічних, програмних і інших засобів являється використання критерію простого функціонального балансування різними ресурсами. Виявлення вузьких місць в системі означає знаходження ресурсів, обмеженість яких істотно впливає на ефективне використання інформаційної технології, що, у свою чергу, призводить до неповноти, суперечності, несвочасності інформації і неефективності наступних рішень, що приймаються на основі цієї інформації.

Ідейні викладки подібної оптимізації ресурсів наведені ще Дж. Фон Нейманом, який висловив наступне положення: «Ми хотіли б ввести до машини у вигляді електронних схем тільки такі логічні структури, які або потрібні для функціонування повноцінної системи, або дуже зручні, оскільки часто використовуються». Для успішного виконання такої оптимізації потрібна детальна інформація про досліджувані процеси і параметри. Ця інформація може бути отримана двома способами: статичними або динамічними вимірами частоти тієї інформації, що найбільше зустрічається серед досліджуваних параметрів.

Результат аналізу цієї інформації дозволяє:

- перепланувати проходження завдання (для кращого завантаження наявних ресурсів, для керування черговістю вирішення задач при кластерних обчисленнях);

- визначити найбільш «вузькі місця» в інформаційній технології (для визначення її життєздатності, балансування за критеріями продуктивності і ресурсозберігання);

- визначити живучість інформаційної технології при різних варіантах конфігурації системи;

- оптимізувати конфігурацію обчислювальних засобів для конкретного застосування окремої інформаційної технології у певний проміжок часу;

- визначити міру сумісності від двох до  $n$  процесів;

- організувати ефективне функціонування паралельно працюючих процесів;

- удосконалити існуючу систему команд шляхом введення нових команд і виключення тих, що використовуються зрідка;

- оптимізувати структуру полів команд (кодів операції, адрес, посилань на операнди, даних);

- оптимізувати архітектуру системи під певну інформаційну технологію;

- оптимізувати пропускні здібності каналів зв'язку;

- оптимізувати надійність компонентів обчислювальної системи як єдиного цілого;

- оптимізувати кількість рівнів, об'єм і час обміну між різними рівнями і видами пам'яті;

- оптимізувати пропускну спроможність каналів зв'язку усередині і поза обчислювальною системою;

- оптимізувати організацію обчислювальних процесів.

Необхідно пам'ятати, що існує сильна кореляція між статичними і динамічними частотними характеристиками програм. Це дозволяє вибрати в якості основи оптимізації цих статичних або динамічних вимірів і отримати при цьому вигреш відразу за двома критеріями – часовою або алгоритмічною складністю, наприклад, часу виконання програм і завантаженням наявних ресурсів, на яких використовують інформаційну технологію. Скорочення часу виконання програм і об'єму займаної ними пам'яті на різних обчислювальних пристроях з різними операційними системами (персональному комп'ютері, ноутбучі або планшеті, що працюють відповідно на Linux, Windows та Android) можна добитися за рахунок введення в систему нових спеціальних команд для виконання функцій, що часто зустрічаються.

Ще одним підходом до підвищення живучості інформаційної технології є використання кодів змінної довжини, обернено пропорційної частоті кодів, що використовуються найчастіше (коди операції і інших параметрів команди). Такий підхід використовується в алгоритмах стискування інформації і використання змінного формату команд.

Критерій балансування ресурсами широко використовується в економіці і управлінні підприємствами і виходить з положення, що доцільно усувати «вузькі місця» шляхом перерозподілу ресурсів. Так, виходячи з економічних і інших чинників, немає сенсу домагатися пікової продуктивності окремих груп пристроїв і пропускної спроможності каналів, якщо середні показники значно менше цього рівня. В цьому випадку більш виправдано здійснити перерозподіл



ресурсів з метою підвищення не пікової, а середньої продуктивності системи на заданому класі завдань, що у підсумку забезпечить певний рівень надійності виконання завдань та живучість інформаційної технології при значних коливаннях навантаження на пристрої та канали зв'язку.

Зазначені питання постають у наступній ситуації. Припустимо, відбувається вирішення надзвичайної ситуації, що виникла на небезпечному об'єкті. Задіяні різні за підпорядкуванням сили рятувальників, що оснащені різноманітною за характеристиками комп'ютерною та телекомунікаційною технікою. Координація відбувається з пересувного оперативного штабу, який складається з декількох модулів і оснащений технікою з використанням інформаційної технології для ситуаційного рішення поставлених задач. Оперативні системи обчислювальної техніки штабу – Windows 7.0 – 10. Декілька віддалених фахівців, що забезпечують роботи баз даних, працюють під операційною системою Linux за допомогою швидкісного Інтернету. Оперативні групи рятувальників, командири яких оснащені бюджетними планшетами з системою Android, версіями 4.0 – 7.0, повинні отримувати оперативну інформацію через Wi-Fi про загальний стан небезпечного об'єкта, а також звертатися до баз даних для коригування власних дій в межах своєї, більш вузької задачі. Тож можна з високою долею вірогідності стверджувати, що один і той же алгоритм вирішення окремої задачі може виконуватися декілька мілісекунд на техніці, що розташована у штабі, і декілька хвилин, а то й десятків хвилин, на техніці командирів оперативних груп, що є неприпустимим при координації рятувальної операції у надзвичайних умовах, бо може призвести до того, що частина діючих осіб отримуватиме нерелевантну інформацію в процесі розвитку подій. У зв'язку з зазначеним можна припустити, що одночасно слід не лише оптимізувати алгоритми виконання окремих задач, а й збалансувати взаємодію різної техніки за критерієм продуктивності.

## **Висновки**

У даній роботі наведені підсумки огляду шляхів забезпечення релевантності інформації у часі при здійсненні пошукового запиту. Згідно з цим оглядом та аналізом літературних джерел можна представити наступні висновки та узагальнення, які дозволяють, в залежності від ситуації, використовувати різноманітні підходи для отримання релевантної інформації на практиці:

1) забезпечення живучості інформаційно-довідкової та інформаційно-пошукової системи можна представити як надання такою системою релевантної інформації за умов невизначеності із забезпеченням повноти, несуперечності і своєчасності в будь-який момент часового відрізка.

2) При розробці інформаційно-пошукової та/або інформаційно-довідкової системи, що працюють як через веб-додаток, так і в режимі онлайн, основну увагу слід звернути на базову модель такої системи з можливістю адаптації, що дозволить представити релевантну інформацію в певний момент часу з мінімізацією помилок. При розробці подібних інформаційних систем на основі веб-платформи, основу можуть скласти, наприклад, розгалужені алгоритми, які реалізують задачу максимізації сходження в одній точці з забезпеченням повноти і несуперечності інформації за запитом користувача.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Закон України. Про Національну програму інформатизації. 74/98-ВР // Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1998, N 27-28, ст. 181.
2. Українська радянська енциклопедія : у 12 т. / гол. ред. М.П. Бажан ; редкол.: О.К. Антонов та ін. – 2-ге вид. – К. : Головна редакція УРЕ, 1974–1985.
3. Філософський енциклопедичний словник / В.І. Шинкарук (голова редколегії) та ін. ; Л.В. Озадовська, Н.П. Поліщук (наукові редактори) ; І.О. Покаржевська (художнє оформлення). – Київ : Абрис, 2002. – 742 с. – ISBN 966-531-128-X.
4. Энциклопедия кибернетики: в 2 т. / Под. ред. В.М. Глушкова и др. – К.: Главная редакция украинской советской энциклопедии, 1974. – 1228 с.
5. Сагатовский В.Н. Основы систематизации всеобщих категорий / В.Н. Сагатовский. – Томск: Изд-во ТМИ, 1973. – 431 с.
6. Юридична енциклопедія : [в 6-ти т.] / ред. кол. Ю. С. Шемшученко (відп. ред.) [та ін.]. – К. : Українська енциклопедія, 2002. – Т. 4 : Н – П. – 720 с. : іл. – ISBN 966-7492-04-4.
7. Закон України № 1264-ХІІ, Про охорону навколишнього природного середовища. Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1991, № 41, ст. 546.
8. Мескон М.Х. Основы менеджмента / Мескон М.Х., Альберт М., Хедоуори Ф. – Москва: «Дело», 2006. – 700 с.
9. Додонов А.Г. Введение в теорию живучести вычислительных систем / А.Г. Додонов, М.Г. Кузнецова, Е.С. Горабчик. – К.: Наук. думка, 1990. – 184 с.
10. Волик Б.Г. Эффективность, надежность и живучесть управляющих систем / Б.Г. Волик, И.А. Рябинин // Автоматика и телемеханика. – 1984. – № 12. – С. 151–160.
11. Згуровський М.З. Системний аналіз. Проблеми, методологія застосування / М.З. Згуровський, Н.Д. Панкратова. – К.: «Наукова думка», 2011. – 728 с.
12. ДСТУ 2860-94 Надійність техніки. Терміни та визначення.
13. Кулік, О. Автоматизована каталогізація: досвід, проблеми, перспективи [Текст] / О. Кулік // Бібл. форум України. – 2003. – № 2. – С. 11–12.
14. Єжова Л. Ф. Інформаційний маркетинг: Навч. посібник. – К.: КНЕУ, 2002. – 560 с. ISBN 966–574–349–X.
15. CASREACT® User Guide. Електронний ресурс: [http://www.stn-international.com/fileadmin/be\\_user/STN/pdf/search\\_materials/chemistry/casreact\\_user\\_guide.pdf](http://www.stn-international.com/fileadmin/be_user/STN/pdf/search_materials/chemistry/casreact_user_guide.pdf)
16. Полярус Ю.А. Довідково-інформаційна система як складова частина системи обробки даних / Ю.А. Полярус, О.О. Ляковський, П.М. Сінченко, О.Л. Сотніков, І.П. Овсійчук // Науковий збірник Інституту державного управління у сфері цивільного захисту. – 2013. – № 1. – С. 53–59.
17. Тесленко Г.С. Інформаційні системи в аграрному менеджменті. – К.: КНЕУ. – 1999. – 232 с.
18. Rainer, R. Kelly and Cegielski, Casey G. (2009). "Introduction to Information Systems: Enabling and Transforming Business, 3rd Edition".
19. Ayers, Phoebe; Matthewslo, Charles; Yates, Ben (2008). How Wikipedia Works. No Starch Press. ISBN 9781593271763.
20. Додонов, А.Г. Живучесть информационных систем / А.Г. Додонов, Д.В. Ландэ – К.: Наук. думка, 2011. – 256 с.
21. Бир Ст. Мозг фирмы / Бир Ст. – М.: Либроком, 2009. – 416 с.
22. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем / Бусленко Н.П. – М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1978. – 400 с.
23. Академик В.М. Глушков – пионер кибернетики / Составитель В.П. Деркач. – К.: Издательство Юниор, 2003. – 384 с.
24. Теслер Г.С. Концепция построения гарантоспособных вычислительных систем / Г.С. Теслер // Математичні машини і системи. – 2006. – №1. – С. 134–145.

## REFERENCES

1. Zakon Ukrainy. Pro Natsionalnu prohramu informatyzatsii. 74/98-VR // Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy (VVR), 1998, N 27-28, st. 181.
2. Ukrainskaadianska entsyklopediia : u 12 t. / hol. red. M.P. Bazhan ; redkol.: O.K. Antonov ta in. – 2-he vyd. – K. : Holovna redaktsiia URE, 1974–1985.
3. Filosofskiy entsyklopedychnyi slovnyk / V.I. Shynkaruk (holova redkolehii) ta in. ; L.V. Ozadovska, N.P. Polishchuk (naukovi redaktory) ; I.O. Pokarzhevskaya (khudozhnie oformlennia). – Kyiv : Abrys, 2002. – 742 s. – ISBN 966-531-128-X.
4. Entsyklopedyia kybernetyky: v 2 t. / Pod. red. V.M. Hlushkova y dr. – K.: Hlavnaia redaktsiia ukraïnskoi sovetskoi entsyklopedyy, 1974. – 1228 s.
5. Sagatovskiy V.N. Osnovy sistematzatsii vseobshchikh kategori y / V.N. Sagatovskiy. – Tomsk: Izd-vo TMI. 1973. – 431 s.
6. Yurydychna entsyklopediia : [v 6-ty t.] / red. kol. Yu. S. Shemshuchenko (vidp. red.) [ta in.]. – K. : Ukrainska entsyklopediia, 2002. – T. 4 : N – P. – 720 s. : il. – ISBN 966-7492-04-4.
7. Zakon Ukrainy № 1264-XII, Pro okhoronu navkolyshnoho pryrodnoho seredovyscha. Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy (VVR), 1991, № 41, st. 546.
8. Meskon M.Kh. Osnovy menedzhmenta / Meskon M.Kh., Albert M., Khedouori F. – Moskva: «Delo». 2006. – 700 s.
9. Dodonov A.G. Vvedeniye v teoriyu zhivuchesti vychislitelnykh sistem / A.G. Dodonov, M.G. Kuznetsova, E.S. Gorabchik. – K.: Nauk. dumka. 1990. – 184 s.
10. Volik B.G. Effektivnost. nadezhnost i zhivuchest upravlyayushchikh sistem / B.G. Volik, I.A. Ryabinin // Avtomatika i telemekhanika. – 1984. – № 12. – S. 151–160.
11. Zghurovskiy M.Z. Systemnyi analiz. Problemy, metodolohiia zastosuvannia / M.Z. Zghurovskiy, N.D. Pankratova. – K.: «Naukova dumka», 2011. – 728 s.
12. DSTU 2860-94 Nadiinist tekhniky. Terminy ta vyznachennia.
13. Kulik, O. Avtomatyzovana katalohizatsiia: dosvid, problemy, perspektyvy [Tekst] / O. Kulik // Bibl. forum Ukrainy. – 2003. – № 2. – S. 11–12.
14. Yezhova L.F. Informatsiyni marketynh: Navch. posibnyk. — K.: KNEU, 2002. — 560 s. ISBN 966–574–349–Kh.
15. CASREACT® User Guide. Електронний ресурс: [http://www.stn-international.com/fileadmin/be\\_user/STN/pdf/search\\_materials/chemistry/casreact\\_user\\_guide.pdf](http://www.stn-international.com/fileadmin/be_user/STN/pdf/search_materials/chemistry/casreact_user_guide.pdf)
16. Poliarus Yu.A. Dovidkovo-informatsiina systema yak skladova chastyna systemy obrobky danykh / Yu.A. Poliarus, O.O. Liaskovskiy, P.M. Sinchenko, O.L. Sotnikov, I.P. Ovsiichuk // Naukovyi zbirnyk Instytutu derzhavnoho upravlinnia u sferi tsyvilnoho zakhystu. – 2013. – № 1. – S. 53–59.
17. Teslenko H.S. Informatsiini systemy v ahrarnomu menedzhmenti. – K.: KNEU. – 1999. – 232 s.
18. Rainer, R. Kelly and Cegielski, Casey G. (2009). "Introduction to Information Systems: Enabling and Transforming Business, 3rd Edition".
19. Ayers, Phoebe; Matthewslo, Charles; Yates, Ben (2008). How Wikipedia Works. No Starch Press. ISBN 9781593271763.
20. Dodonov. A.G. Zhivuchest informatsionnykh sistem / A.G. Dodonov. D.V. Lande – K.: Nauk. dumka. 2011. – 256 s.
21. Bir St. Mozg firmy / Bir St. – M.: Librokom. 2009. – 416 s.
22. Buslenko N.P. Modelirovaniye slozhnykh sistem / Buslenko N.P. – M.: Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury izdatelstva «Nauka». 1978. – 400 s.
23. Akademik V.M. Glushkov – pioner kibernetiki / Sostavitel V.P. Derkach. – K.: Izdatelstvo Yuniior. 2003. – 384 s.
24. Tesler G.S. Kontsepsiya postroyeniya garantospobnykh vychislitelnykh sistem / G.S. Tesler // Matematichni mashini i sistemi. – 2006. – №1. – S. 134–145.

*Стаття надійшла до редакції 20.05.2019.*

**В.А. ВАСЯНИН, Ю.В. ЗАЯЦ, Л.П. УШАКОВА**

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГРУЗОПОТОКОВ НА АВТОТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ МЕЖДУНАРОДНЫХ ПЕРЕВОЗОК**

***Аннотация.** В статье приводится пример математического моделирования задач оптимизации иерархической структуры и распределения потоков грузов в реальной автотранспортной сети международных перевозок. Приведены математические формулировки основных задач оптимизации. Показано, что в результате решения оптимизационных задач удалось снизить затраты на обработку и транспортировку заданных потоков грузов на 21%. Важной особенностью разработанных компьютерных программ является их универсальность, что позволяет проводить моделирование и оптимизацию функционирования не только традиционных логистических систем, но и производственных транспортно-складских систем, включающих узлы поставщиков сырья, производства товаров, склады и конечных потребителей.*

***Ключевые слова:** математическое моделирование, иерархические автотранспортные сети, оптимизация структуры сети и распределения потоков грузов*

**DOI: 10.35350/2409-8876-2020-18-1-62-75**

### **Введение**

В настоящее время для существующих автотранспортных сетей в различных отраслях хозяйства характерно то, что на всех уровнях управления уже введены различные автоматизированные и информационные системы. Предусматривается дальнейшее их развитие с использованием новейших информационных технологий; современного методического, технического и математического обеспечений; систем поддержки принятия решений, рационально сочетающих формальные и неформальные методы принятия решений и интерактивный режим анализа и выбора оптимальных решений. Оптимизация структуры и распределения грузовых потоков в государственных и корпоративных (частных) автотранспортных сетях и автоматизация процессов управления в них являются актуальными и перспективными направлениями в достижении качественно нового уровня развития транспортной отрасли и интенсификации рыночных преобразований в Украине. Практические исследования показывают, что на протяжении последних лет объемы перевозок грузов в контейнерах и на поддонах в транспортных сетях Украины увеличиваются недостаточно интенсивно. Так, например, в США в год перевозится более 15 миллиардов тонн мелкопартионных грузов на общую сумму более 9 триллионов долларов, а доходы от транспортировки таких грузов составляют около 11% от валовой национальной продукции США [1]. Основными причинами этого являются организационно-техническая подготовленность государственных и частных транспортных предприятий к внедрению современных

информационно-аналитических систем, технологий и инструментальных средств автоматизированного проектирования, управления и поддержки принятия решений, в том числе и с использованием ситуационных центров обработки и представления информации. Кроме того, в большинстве существующих в настоящее время автоматизированных транспортных систем не реализованы научно обоснованные методы математического моделирования перевозок мелкопартионных грузов в контейнерах и на поддонах и отсутствуют инструментальные средства для управления такими перевозками.

Поскольку физическая пространственная структура большинства автотранспортных сетей уже сложилась, в первую очередь, наибольший интерес представляет решение задач тактического планирования и оперативного управления, нацеленных главным образом на оптимизацию их функционирования при имеющихся ресурсах.

Цель исследования настоящей работы заключается в том, чтобы показать, как можно повысить экономическую эффективность функционирования реальной автотранспортной сети перевозок за счет математического моделирования и оптимизации ее структуры и процессов обработки и распределения потоков грузов. Моделирование выполняется с помощью компьютерных программ, которые входят в состав инструментальных программных средств информационно-аналитической системы поддержки принятия решений (ИАС ППР), разрабатываемой в Институте телекоммуникаций и глобального информационного пространства НАН Украины.

## **1. Постановка и математическая модель задачи оптимизации структуры сети и схемы сортировки потоков**

Существующие и проектируемые территориально-распределенные автотранспортные сети являются многоуровневыми и состоят из децентрализованной распределенной магистральной сети и низовых фрагментарных сетей — зональных и внутренних на нижних уровнях иерархии. В работе рассматриваются автотранспортные многопродуктовые сети, для которых характерно наличие множества источников и стоков потоков грузов унифицированного размера. В многопродуктовой сети каждый узел может обмениваться потоками грузов со всеми остальными узлами. Потоки грузов могут быть заданы матрицей, в которой строки соответствуют узлам-источникам, столбцы — узлам-стокам, а элементы матрицы определяют величину потока. В сети имеется четыре типа территориально расположенных узлов с известными географическими координатами. Узлы первого, второго и третьего типов называются магистральными и образуют магистральную сеть, а узлы четвертого типа находятся во внутренней зоне каждого магистрального узла и подчинены этому узлу. Узлы первого типа могут сортировать потоки грузов во все магистральные узлы в зоне своего обслуживания и во все другие узлы первого типа в магистральной сети. В узлах второго и третьего типа число магистральных направлений сортировки грузов ограничено числом узлов, находящихся внутри и на границе их зон обслуживания. В узлах магистральной сети все грузы перед отправкой должны сортироваться и

упаковываться в транспортные блоки (контейнеры, поддоны) заданного размера. Размер транспортного блока измеряется количеством вмещающихся в него единиц груза. Поскольку количество грузов, адресованных в какой-либо магистральный узел сети, может быть значительно меньше размера транспортного блока, то они при сортировке могут несколько раз и в разных узлах объединяться с грузами, имеющими другие адреса назначения. При таком объединении грузов в узлах сети уменьшается количество направлений их сортировки и количество транспортных блоков, необходимых для их упаковки, но в отдельных узлах появляются дополнительные объемы сортировки грузов, не достигших адресов своего назначения. Кроме того, увеличивается время доставки получателю тех грузов, которые проходят дополнительную сортировку в транзитных узлах следования. В узлах четвертого типа потоки грузов не сортируются, а непосредственно отправляются в соответствующий магистральный узел. Узлы второго и третьего типа отличаются от узлов первого типа функциональными возможностями, уровнем технической оснащенности, числом обслуживающего персонала, функциями затрат на обработку потоков и пр. В этих узлах запрещена сортировка транзитных потоков грузов, а в узлах третьего типа также запрещена обработка транзитных потоков транспортных блоков.

Типы узлов и зоны их обслуживания могут задаваться проектировщиком сети или определяться в автоматизированном режиме. В любом случае решается задача выбора оптимальной структуры сети по критерию минимума приведенных затрат на ее функционирование и устанавливается состав и количество узлов каждого типа.

Описание принципов и технологии обработки и транспортировки потоков в иерархической сети, а также описание состава и работы ИАС ППР приведено в работе [2].

В работах [3, 4] рассмотрена математическая модель NP-трудной задачи упаковки и распределения потоков, в которой учтены особенности сортировки и транспортировки грузов в иерархической многопродуктовой сети и предложен эвристический подход к ее решению, основанный на дискретном аналоге метода локального спуска. Следуя этим работам, запишем математическую модель задачи в следующем виде.

Пусть  $G(N, P)$  — иерархическая магистральная сеть с множеством неориентированных дуг  $P$ ,  $p = |P|$  и множеством узлов  $N = N_1 \cup N_2 \cup N_3$ ,  $n = |N|$ , где  $N_1, N_2, N_3$  — множества узлов первого, второго и третьего типа соответственно. Узлы сети соответствуют пунктам сортировки, отправления, назначения и перегрузки потоков грузов, а дуги — участкам дорог транспортных сетей, связывающим узлы сети. Задана целочисленная матрица  $A = \|a_{ij}\|_{n \times n}$ , в которой значения  $a_{ij}$  равны сумме потоков грузов между узлами четвертого типа внутренней сети  $i$ -го узла. Эти потоки не подлежат распределению по магистральной сети, но должны учитываться при расчете затрат на сортировку потоков грузов в магистральных узлах. Принимается, что число узлов четвертого типа во внутренней сети каждого  $i$ -го магистрального узла, а значит, и число

направлений сортировки  $q_{in}^i$  из этих узлов на внутренние узлы четвертого типа известны и относительно постоянны. Предполагается, что потоки между узлами четвертого типа, подчиненными разным магистральным узлам, учтены в потоковой матрице  $A$ . Процедура преобразования внешних потоков из узлов и в узлы четвертого типа в потоки на магистральной сети выполняется в компьютерной программе при решении задачи редукции полной сети к магистральной. Грузы  $a_{ij}$  из источников  $i$  в стоки  $j$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ ,  $i \neq j$  упаковываются в транспортные блоки размера  $\omega \gg a_{ij}$  и отправляются получателям. Предполагается, что при сортировке в узлах грузы могут объединяться с другими грузами только целиком.

Введем переменные  $x_{ij}$  и  $u_{ij}$ , определяющие соответственно величину потока грузов из  $i$  в  $j$  в исходных единицах и в транспортных блоках,

$$u_{ij} = \left\lceil \frac{x_{ij}}{\omega} \right\rceil, \text{ где знаки } \lceil \cdot \rceil \text{ означают округление числа до большего целого.}$$

Обозначим  $S$  — множество пар индексов  $(i, j)$  корреспондирующих узлов в сети. Для выбора оптимальной иерархической структуры магистральной сети для различных составов типов узлов будем многократно решать задачу (1)-(3) до тех пор, пока не будет найдена такая структура, при которой достигается минимум суммарных приведенных затрат на ее функционирование. Требуется найти минимум функции

$$F = \sum_{ij \in S} C_{tr}^{ij}(u_{ij}, d_{ij}) + \sum_{i=1}^n C_{sort}^i(x_i, q_i) + \sum_{i=1}^n C_{load}^i(u_i) \quad (1)$$

при ограничениях

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} = \sum_{j=1}^n x_{ji} - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ji}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} \leq h_i, \quad i = \overline{1, n}. \quad (3)$$

Здесь  $x_{ij} = a_{ij} + \sum_{rs} a_{rs}^*$ , если поток грузов  $a_{ij}$  не объединялся ни с каким другим потоком, где  $\{a_{rs}^*\}$  — множество потоков, объединенных с потоком  $a_{ij}$  и  $x_{ij} = 0$ , если поток  $a_{ij}$  объединялся с каким-либо другим потоком или  $i = j$ ;  $C_{tr}^{ij}(u_{ij}, d_{ij})$  — дискретная функция транспортных затрат, зависящая от грузоподъемности транспортного средства  $W$ , количества транспортных блоков  $u_{ij}$  и длины  $d_{ij}$  — пути их транспортировки между узлами  $i$  и  $j$ ;  $C_{sort}^i(x_i, q_i)$  — нелинейная функция затрат от суммарного объема  $x_i = a_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^n (a_{ij} + a_{ji}) + \sum_{j=1}^n x_{ij} - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij}$  и количества направлений сортировки  $q_i = q_{in}^i + \sum_{j=1}^n \delta_{ij}$  грузов, обрабатываемых в узле  $i$

( $\delta_{ij} = 1$ , если  $x_{ij} \neq 0$ , и  $\delta_{ij} = 0$ , если  $x_{ij} = 0$ , а  $q_{in}^i$  определяет заданное количество направлений сортировки для обработки грузов  $a_{ii}$ ,  $i = \overline{1, n}$ );  $C_{load}^i(u_i)$  — нелинейная функция затрат от суммарного количества транспортных блоков  $u_i = \sum_{j=1}^n (u_{ij} + u_{ji})$ , обрабатываемых в узле  $i$ ;  $h_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ , — максимальная пропускная способность  $i$ -го узла по обработке транзитных грузов. Пропускная способность задается для транзитных потоков грузов, так как исходящие и входящие потоки для каждого узла должны быть обработаны безусловно. Для узлов второго и третьего типа  $h_i = 0$ .

При решении задачи также учитываются дополнительные ограничения на время доставки  $t_{ij} \leq T_{ij} \quad \forall ij \in S$  и число транзитных объединений  $v_{ij} \leq v_{max} \quad \forall ij \in S$  грузов при их транспортировке из узлов отправления в узлы назначения, где  $T_{ij}$  и  $v_{max}$  — соответственно заданное время доставки грузов получателю и максимально допустимое число транзитных объединений грузов. При расчете времени доставки используются параметры, явно не входящие в модель: заданное время на сортировку грузов и время на транзитную перегрузку транспортных блоков в узлах сети, средняя скорость движения транспортных средств и др. (см. разд. 3).

Первая составляющая функции (1) определяет транспортные затраты, вторая — затраты на сортировку, а третья — затраты на обработку транспортных блоков. Выражения (2) и (3) представляют условия баланса и ограничения на пропускные способности узлов.

В [5] показано, что при решении задачи выбора структуры сети дискретная функция  $C_{tr}^{ij}(u_{ij}, d_{ij})$  может быть заменена на функцию удельной стоимости транспортировки потока грузов величиной  $u_{ij}$  на расстояние  $d_{ij}$  от грузоподъемности транспортного средства  $W$ . Например, можно считать, что  $C_{tr}^{ij}(u_{ij}, d_{ij}) = u_{ij}(k_1^\xi + k_2^\xi d_{ij}) / W \quad \forall ij \in S$ , где  $k_1^\xi$ ,  $k_2^\xi$  — заданные коэффициенты, а  $W \in \{w_1, w_2, \dots, w_\alpha\}$ ,  $\xi = \overline{1, \alpha}$  — различная грузоподъемность транспортных средств в транспортных блоках размера  $w$ . При этом структура сети не зависит от выбора значения  $W$ , а транспортные затраты рассчитываются для заданного значения  $W$ .

Решение задачи (1)-(3) может выполняться в двух режимах: при экспертном задании и автоматическом выборе типов и зон обслуживания узлов. При экспертном задании структура сети определяется проектировщиками на основании опыта и практических знаний. В любом случае будет итеративно решаться задача (1)-(3) для различных составов типов узлов и зон их обслуживания до тех пор, пока не будет найдена структура, при которой достигается минимум целевой функции (1).

Помимо структуры сети, основными результатами решения задачи (1)-(3) являются потоковые матрицы  $X = \|x_{ij}\|_{n \times n}$  и  $U = \|u_{ij}\|_{n \times n}$  грузов в



исходных единицах и в транспортных блоках; матрица  $T = \|T_{ij}\|_{n \times n}$  предварительных оценок времени доставки грузов получателям; справочная матрица объединения потоков грузов. Справочная матрица объединения потоков полностью определяет схему сортировки грузов во всех узлах сети и адресует потоки транспортных блоков, которые будут распределены по маршрутам транспортных средств. В узлах реальной транспортной сети справочная матрица используется для автоматизированного управления оборудованием, осуществляющим процессы сортировки адресных грузов.

При решении задачи оптимизации структуры сети транспортные затраты и затраты на обработку транспортных блоков рассчитываются предварительно. Реальные оценки этих затрат и фактическое время доставки грузов получателю могут быть получены только после решения задачи распределения и маршрутизации сформированных транспортных блоков на транспортной сети [6].

## 2. Постановка и математическая модель задачи оптимизации распределения и маршрутизации потоков

Содержательная постановка задачи заключается в выборе такой схемы распределения и маршрутизации потоков транспортных блоков, сформированных при решении задачи выбора иерархической структуры магистральной сети и схемы сортировки грузов в узлах сети, при которой максимально снижаются приведенные затраты на обработку и транспортировку потоков. Решение задачи должно осуществляться в интерактивном режиме и определять основные технико-экономические показатели функционирования магистральной сети при изменении исходных данных, параметров и ограничений транспортной модели.

В [7] предложены математическая модель NP-трудной задачи распределения и маршрутизации транспортных блоков с упакованными в них грузами или сообщениями. Следуя этой работе, рассмотрим математическую модель задачи в такой постановке.

Потоки грузов заданы исходной целочисленной матрицей  $A = \|a_{ij}\|_{n \times n}$  и преобразованной целочисленной матрицей  $A' = \|a'_{ij}\|_{n \times n}$ , которая совпадает с матрицей  $X = \|x_{ij}\|_{n \times n}$ , полученной после решения задачи оптимизации структуры сети. Пусть  $\tilde{A} = \|\tilde{a}_{ij}\|_{n \times n}$ ,  $\tilde{a}_{ij} = \left\lceil \frac{a'_{ij}}{\omega} \right\rceil$  — матрица потоков транспортных блоков, совпадающая с матрицей  $U = \|u_{ij}\|_{n \times n}$ . Кроме того на вход задачи поступает матрица предварительных оценок времени доставки грузов получателям  $T = \|T_{ij}\|_{n \times n}$ , элементы которой выступают в качестве начальных ограничений на время доставки при решении задачи распределения и маршрутизации потоков транспортных блоков.

Обозначим через  $\{m_k\}$ ,  $k = \overline{1, l}$ , — заданное множество проектируемых маршрутов транспортных средств, каждый из которых состоит из последовательности узлов и дуг сети  $G$ , соединяющей начальный и конечный узлы маршрута. Предполагается, что множество  $\{m_k\}$  для каждой неориентированной дуги сети  $G$  содержит прямой и обратный маршруты, и в процессе решения задачи во множество  $\{m_k\}$  могут включаться новые маршруты, генерируемые по определенным правилам. Множество  $\{m_k\}$  может содержать несколько маршрутов, соединяющих любую пару узлов. С каждым маршрутом транспортной сети связаны его характеристики: функция среднегодовых приведенных затрат на эксплуатацию и содержание маршрута или тарифы за перевозку единицы груза на маршруте; грузоподъемность и периодичность движения транспортных средств; время прибытия и отправления транспортного средства для каждого узла в маршруте и др. Определим маршрутную мультисеть  $G_M(N, P_M)$ , построенную транзитивным замыканием узлов всех маршрутов из  $\{m_k\}$ , где  $N$  — множество узлов сети,  $P_M$  — множество ее ориентированных маршрутных дуг. Между любыми узлами  $\alpha$  и  $\beta$  сети  $G_M$  существует маршрутная дуга, если они связаны хотя бы одним маршрутом транспортного средства из  $\{m_k\}$ . Введем переменные:  $u_{ij,k}^{\alpha\beta}$  — неизвестный поток транспортных блоков из  $i$  в  $j$ , проходящий по дуге  $p_{\alpha\beta} \in P_M$ , полученной из маршрута  $m_k$  ( $u_{ij,k}^{\alpha\beta}$  определяют дуговые потоки в транспортных блоках на маршрутной сети  $G_M$ );  $u_{ij,k}^{\eta\xi}$  — неизвестный поток транспортных блоков из  $i$  в  $j$ , проходящий по дуге  $p_{\eta\xi} \in P$  на маршруте  $m_k$ .

Требуется минимизировать функцию

$$F = \sum_{k=1}^l C_{tr}^k \left( \left( \sum_{\eta\xi \in q_k} \sum_{ij \in S} u_{ij,k}^{\eta\xi} \right), d_k \right) + \sum_{\beta=1}^n C_{load}^\beta \left( \sum_{\alpha=1}^n \sum_{k=1}^l \sum_{ij \in S} (u_{ij,k}^{\alpha\beta} + u_{ij,k}^{\beta\alpha}) \right) \quad (4)$$

при ограничениях:

$$\sum_{\beta=1}^n \sum_{k=1}^l u_{ij,k}^{\alpha\beta} - \sum_{\beta=1}^n \sum_{k=1}^l u_{ij,k}^{\beta\alpha} = \begin{cases} \tilde{a}_{ij} & \text{при } i = \alpha, \\ 0 & \text{при } i \neq \alpha, j \neq \alpha, \\ -\tilde{a}_{ij} & \text{при } j = \alpha, \text{ для } \alpha = \overline{1, n}, ij \in S; \end{cases} \quad (5)$$

$$\sum_{\alpha=1}^n \sum_{k=1}^l \sum_{ij \in S} (u_{ij,k}^{\alpha\beta} + u_{ij,k}^{\beta\alpha}) - \sum_{j=1}^n (\tilde{a}_{\beta j} + \tilde{a}_{j\beta}) \leq 2b_\beta, \quad \beta = \overline{1, n}; \quad (6)$$

$$\sum_{ij \in S} u_{ij,k}^{\eta\xi} \leq W_{\eta\xi}^k \text{ для всех } \eta\xi \in q_k, k = \overline{1, l}; \quad (7)$$

$$\sum_{\beta=1}^n \sum_{ij \in S} (u_{ij,k}^{\alpha\beta} + u_{ij,k}^{\beta\alpha}) \leq b_\alpha^k, \quad \alpha \in v_k, k = \overline{1, l}; \quad (8)$$

$$u_{ij,k}^{\alpha\beta} \geq 0, u_{ij,k}^{\eta\xi} \geq 0 - \text{целые числа.} \quad (9)$$

Предполагается, что имеется оператор  $\Phi: u_{ij,k}^{\alpha\beta} \Rightarrow \{u_{ij,k}^{\eta\xi}\}$ ,  $p_{\alpha\beta} \in P_M$ ,  $p_{\eta\xi} \in P$ ,  $ij \in S$ ,  $k = \overline{1, l}$ , отображающий поток по маршрутной дуге маршрута  $m_k$  в сети  $G_M$  на соответствующее подмножество дуг маршрута  $m_k$  в сети  $G$ ; учитываются ограничения на время доставки грузов получателю  $t_{ij} \leq T_{ij}$ ,  $ij \in S$ .

В конкретных случаях решения задачи к указанным ограничениям могут быть добавлены ограничения на запрет разветвления потоков:

$$u_{ij,k}^{\alpha\beta} = \begin{cases} \tilde{a}_{ij}, & \text{если поток проходит по дуге } \alpha\beta \in m_k, \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (10)$$

В формулах (4)-(8) введены обозначения:  $C_{tr}^k$  — нелинейная функция, определяющая зависимость транспортных затрат от количества транспортных блоков, передаваемых по маршруту  $m_k$ , и от длины маршрута  $d_k$ ;  $q_k$  — упорядоченное множество дуг из  $P$ , составляющих маршрут  $m_k$ ;  $C_{load}^\beta$  — нелинейная функция затрат на обработку транспортных блоков в узле  $\beta$ ;  $b_\beta$ ,  $\beta = \overline{1, n}$  — максимальная пропускная способность  $\beta$ -го узла в транспортных блоках, пропускная способность задается для транзитных потоков, так как исходящие и входящие потоки для каждого узла должны быть обработаны безусловно. Для узлов третьего типа  $b_\beta = 0$ ;  $W_{\eta\xi}^k$  — грузоподъемность транспортного средства на маршруте  $m_k$  на дуге  $\eta\xi \in P$  в транспортных блоках,  $W_{\eta\xi}^k \in \{w_1, w_2, \dots, w_v\}$ , где  $w_1, w_2, \dots, w_v$  — целые, упорядоченные по возрастанию положительные числа;  $b_\alpha^k$  — ограничения на максимальное суммарное число транспортных блоков, которое можно обработать в транзитном узле  $\alpha$  на маршруте  $m_k$ ;  $v_k$  — упорядоченное множество узлов из  $N$  на маршруте  $m_k$ ;  $t_{ij}$ ,  $T_{ij}$ ,  $ij \in S$  — расчетное и заданное время на доставку грузов  $a_{ij}$  из  $i$  в  $j$ .

В связи со сложностью сформулированной задачи в [7] предложен метод ее преобразования к некоторой совокупности более простых линейных многомерных задач о ранце со связующими ограничениями. Для решения преобразованной задачи разработаны алгоритмы, существенно использующие специфику ее структуры, абстрактные типы данных и приемы, характерные для эвристических алгоритмов решения многомерной задачи о ранце.

### 3. Результаты моделирования

По существу, моделирование иерархической структуры и распределения грузопотоков в автотранспортной сети представляет собой компьютерную технологию, состоящую из сценариев действий проектировщика и программной системы при выборе структуры, входных данных и параметров проектируемой сети. Проектировщик в режиме диалога может изменять значения исходных данных и параметров задачи, получать множество решений и выбирать из них наиболее подходящее. При этом он всегда может сравнить варианты решения по оценке технико-экономических показателей функционирования сети в зависимости от выбранных параметров и критериев предпочтения. Описание работы программ оптимизации структуры сети и распределения и маршрутизации потоков транспортных блоков приведено в [8, 9].

Приведем результаты решения задач оптимизации структуры и распределения грузопотоков на реальной автотранспортной сети международных перевозок. Моделирование проводилось на сети узлов Украины (Киев), России (Москва, Санкт-Петербург), Турции (Стамбул, Измир, Бурса, Анкара), Молдавии (Кишинев), Словакии, Польши, Чехии, Венгрии, Болгарии, Италии, Германии (Берлин, Франкфурт-на-Майне, Мюнхен), Франции (Париж, Лион).

Принимались следующие значения исходных данных и параметров: количество узлов в сети  $n = 24$ ; размер одного европоддона (транспортного блока)  $\omega = 3$  единицам грузов; время на сортировку грузов в узлах сети – 24 ч; грузоподъемность автотранспортных средств на всех маршрутах  $\{m_k\}$ ,  $k = \overline{1, 60}$  выбиралась равной  $W = 33$  и  $W = 45$  (33 и 45 европоддонов в одном 20-тонном транспортном средстве; время на транзитную перегрузку транспортных блоков в узлах сети - 12 ч; время стоянки транспортных средств в конечных узлах маршрутов - 22 ч; средняя скорость движения транспортных средств - 80 км/час; пропускные способности узлов по обработке транзитных потоков единичных грузов и транспортных блоков не ограничивались ( $h_i$  и  $b_i$ ,  $i = \overline{1, 24}$ ); время доставки грузов получателю  $t_{ij}$  рассчитывалось в сутках, поэтому максимальное время доставки задавалось в сутках и принималось  $T_{ij} = 15$  сут. для всех  $ij \in S$ ; максимальное число  $V_{\max}$  объединений грузов в транзитных узлах не ограничивалось; разветвление потоков транспортных блоков было запрещено. Движение на маршрутах  $\{m_k\}$ ,  $k = \overline{1, 60}$  транспортных средств разрешалось в обе стороны. Для расчета затрат на обработку и транспортировку заданных потоков грузов (исходная матрица  $A$ ) использовались формулы транспортной компании.

В начальной структуре сети все узлы были узлами первого типа и потоки формировались и распределялись в соответствии с принятой в компании логистической схемой. Задачи оптимизации структуры сети и распределения грузопотоков решались для грузоподъемности транспортных средств  $W = 33$  и  $W = 45$ . После оптимизации структуры сети, в нее было включено 17 узлов первого типа и 7 узлов второго типа для  $W = 33$  и  $W = 45$ , рис. 1. Результаты

решения задач на исходной и оптимизированной сети для грузоподъемности транспортных средств  $W = 33$  и  $W = 45$  приведены в табл. 1 и на рис. 2.

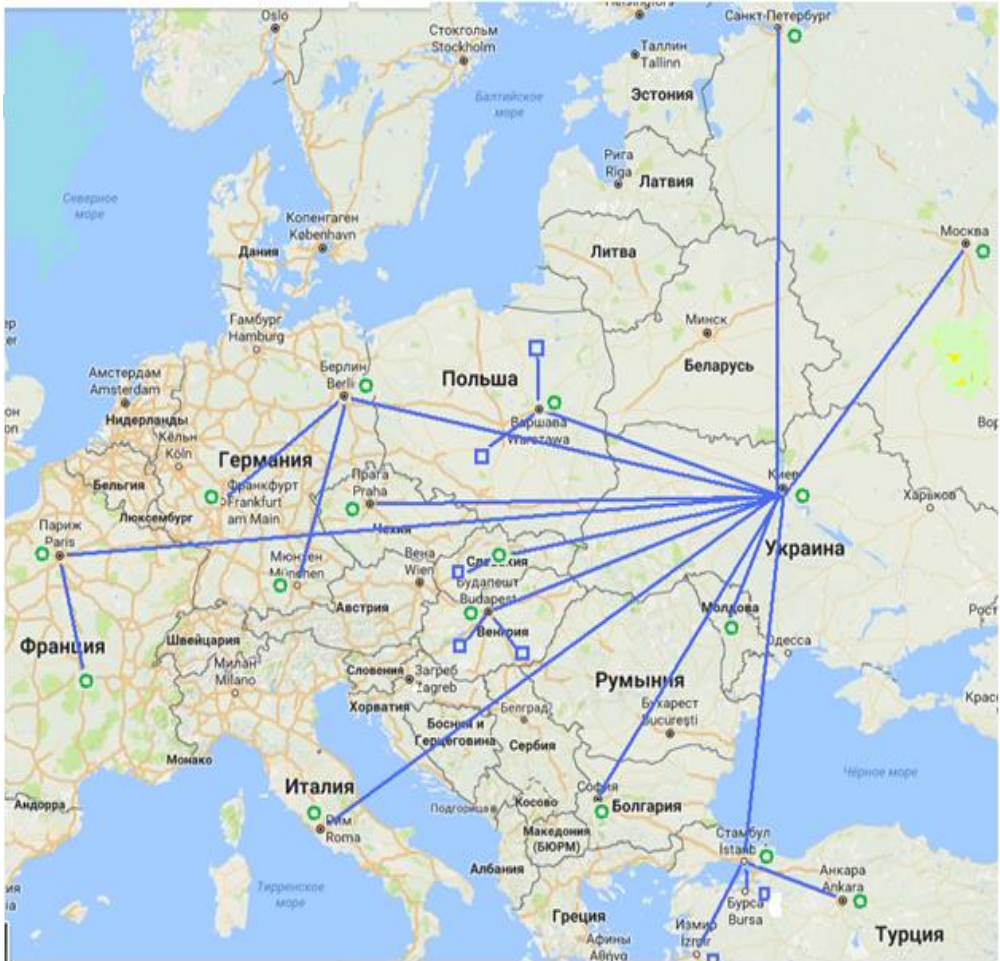


Рисунок 1 – Зеленые окружности – узлы первого типа, синие квадраты – узлы второго типа

Из таблицы видно, что в результате решения задач оптимизации для  $W = 33$  и  $W = 45$  общее снижение затрат на обработку и транспортировку заданных потоков грузов составило порядка 21%, затраты уменьшились соответственно на 0,511 и 0,386 млн. гривен. Все потоки были распределены по заданным маршрутам транспортных средств без введения дополнительных маршрутов. Для бесперебойного функционирования сети при ежесуточной отправке заданных потоков грузов потребителям в обоих случаях потребовалось 179 транспортных средств. Рабочий парк европоддонов соответственно уменьшился на 276 и 282 единиц при достаточно высоком среднем коэффициенте их загрузки. Среднее количество направлений сортировки в узле уменьшилось до 12. Особо следует отметить, что в обоих случаях – до оптимизации и после нее, получен очень низкий коэффициент

Таблица 1 – Результаты решения задач на исходной и оптимизированной сети для грузоподъемности транспортных средств  $W = 33$  и  $W = 45$

Результаты решения	Исходная сеть			
	$W = 33$		$W = 45$	
	$n_1 = 24,$ $n_2 = 0$	$n_1 = 17,$ $n_2 = 7$	$n_1 = 24,$ $n_2 = 0$	$n_1 = 17,$ $n_2 = 7$
Полные затраты (млн. грн.)	2,433	1,922	1,861	1,475
Транспортные затраты	2,155	1,664	1,583	1,217
Затраты на сортировку	0,135	0,128	0,135	0,128
Затраты на погрузку-выгрузку	0,143	0,130	0,143	0,130
Общее снижение затрат	<b>0,511 (21%)</b>		<b>0,386 (20,74%)</b>	
Количество маршрутов	60	60	60	60
Дополнительно введенные маршруты	0	0	0	0
Всего маршрутов	60	60	60	60
Рабочий парк транспортных средств	179	179	179	179
Средняя загрузка транспортного средства на маршруте	0,226	0,175	0,166	0,127
Рабочий парк европоддонов	1722	1446	1725	1443
Средняя загрузка европоддонов	0,937	0,897	0,941	0,898
Среднее количество направлений сортировки в узле	17	12	17	12
Минимальное время доставки	2,52	2,52	2,52	2,52
Максимальное время доставки	9,46	8,64	9,46	8,64
Среднее время доставки	4,14	4,16	4,16	4,16

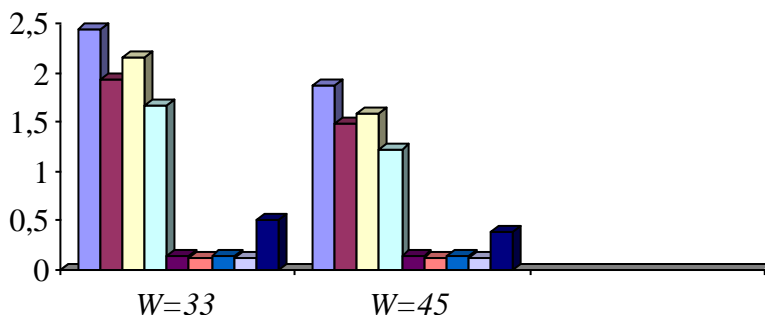
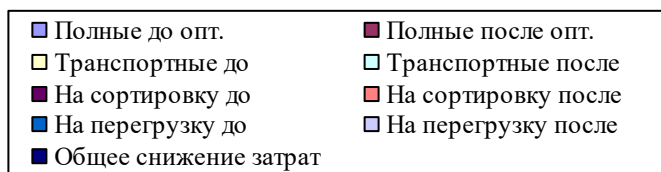


Рисунок 2 – Результаты решения задач

загрузки транспортных средств. Это свидетельствует о том, что транспортное предприятие могло бы уменьшить грузоподъемность своих транспортных средств и значительно снизить производственные издержки. Выбор большей грузоподъемности оправдан только в случае сильного колебания грузопотоков на отдельных промежутках времени.

Время решения задач не превышало 112 секунд на ПК с процессором Intel Core 2 Duo с тактовой частотой 2,66 ГГц и оперативной памятью 2 Гб.

Все программы написаны в среде Microsoft Developer Visual Studio под управлением ОС Windows XP.

## **Заключение**

Предложенная компьютерная технология моделирования распределения грузопотоков на автотранспортной сети включает решение задач оптимизации иерархической структуры сети и схемы распределения и маршрутизации потоков грузов. Технология позволяет в интерактивном режиме моделировать различные варианты сети, изменяя топологию, иерархическую структуру, потоки, параметры и ограничения задач, и из семейства полученных результатов выбирать наилучший вариант с учетом выбранной функции цели и принятых ограничений; рассчитывать технико-экономические показатели функционирования сети при заданных и прогнозных значениях потоков, оценивать стоимость дополнительных ресурсов и планировать величину потребных инвестиций на модернизацию рабочего парка транспортных средств, что в конечном итоге дает возможность повысить эффективность функционирования сети за счет оптимизации использования ее ресурсов и снижения производственных затрат на обработку и транспортировку потоков. Снижение затрат позволяет уменьшать тарифы на перевозку грузов, привлекать дополнительную клиентуру и обеспечивать постоянный прирост прибыли. Так, в результате решения оптимизационных задач на реальной автотранспортной сети международных перевозок удалось снизить затраты на обработку и транспортировку заданных потоков грузов на 21%.

Важной особенностью разработанного инструментария является то, что с его помощью можно проводить моделирование и оптимизацию функционирования не только традиционных логистических систем, но и производственных транспортно-складских систем, включающих узлы поставщиков сырья, производства товаров, склады и конечных потребителей. При этом транспортная сеть может быть представлена различными сочетаниями автомобильных, железнодорожных, авиационных, морских и речных маршрутов транспортных средств с перевозкой грузов в контейнерах, пленочной упаковке и на поддонах. В случае наличия нескольких видов потоков грузов, транспортируемых в сети и отличающихся такими характеристиками, как скорость доставки (срочные или скоропортящиеся грузы), категория качества обслуживания (особо ценные грузы), негабаритные грузы, для каждого вида потока грузов может быть использована отдельная модель транспортной сети со своей функцией цели и ограничениями, что обеспечивается универсальностью разработанного инструментария.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. Cohn A., Root S., Wang A., Mohr D. Integration of the Load-Matching and Routing Problem with Equipment Balancing for Small Package Carrier // *Transportation science*. — 2007. — 41(2). — P. 238-252. DOI: 10.1287/trsc.1060.0174.
2. Васянин В.А., Трофимчук А.Н. Автоматизация процессов принятия решений в многопродуктовых коммуникационных сетях с мелкопартионными дискретными потоками // *Екологічна безпека та природокористування: Зб. наук. праць*. — Київ, 2010. — Вип. 5. — С. 172-213. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/19407>.
3. Trofymchuk O.M., Vasyanin V.A., Kuzmenko V.N. Complexity of One Packing Optimization Problem // *Cybernetics and Systems Analysis*. — 2016. — 52(1). — P. 76-84. DOI: 10.1007/s10559-016-9802-9.
4. Trofymchuk O.M., Vasyanin V.A., Kuzmenko V.N. Optimization Algorithms for Packing of Small-Lot Correspondence in Communication Networks // *Cybernetics and Systems Analysis*. — 2016. — 52(2). — P. 258-268. DOI: 10.1007/s10559-016-9822-5.
5. Васянин В.А., Трофимчук А.Н. Задача выбора иерархической структуры многопродуктовой коммуникационной сети с мелкопартионными дискретными потоками // *Екологічна безпека та природокористування: Зб. наук. праць*. — Київ, 2012. — Вип. 10. — С. 182-204. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/57543>.
6. Trofymchuk O.M., Vasyanin V.A. Simulation of Packing, Distribution and Routing of Small-Size Discrete Flows in a Multicommodity Network // *Journal of Automation and Information Sciences*. — 2015. — 47(7). — P. 15-30. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v47.i7.30.
7. Vasyanin V.A. Problem of Distribution and Routing of Transport Blocks with Mixed Attachments and Its Decomposition // *Journal of Automation and Information Sciences*. — 2015. — 47(2). — P. 56-69. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v47.i2.60.
8. Трофимчук А.Н., Васянин В.А. Компьютерное моделирование иерархической структуры коммуникационной сети с дискретными многопродуктовыми потоками // *УСиМ*. — 2016. — № 2. — С. 48-57. DOI: <https://doi.org/10.15407/usim.2016.02.048>.
9. Васянин В.А. Компьютерное моделирование распределения и маршрутизации дискретных многопродуктовых потоков в коммуникационной сети // *УСиМ*. — 2016. — № 3. — С. 43-53. DOI: <https://doi.org/10.15407/usim.2016.03.043>.

## REFERENCES

1. Cohn A., Root S., Wang A., Mohr D. Integration of the Load-Matching and Routing Problem with Equipment Balancing for Small Package Carrier // *Transportation science*. — 2007. — 41(2). — P. 238-252. DOI: 10.1287/trsc.1060.0174.
2. Vasyanin V.A., Trofymchuk O.M. Avtomatizatsiya protsessov prinyatiya resheniy v mnogoproduktovyih kommunikatsionnyih setyah s melkopartionnyimi diskretnymi potokami // *Ekologichna bezpeka ta prirodokoristuvannya: Zb. nauk. prats.* — Kyiv, 2010. — Vip. 5. — S. 172-213. (In Russian). <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/19407>.
3. Trofymchuk O.M., Vasyanin V.A., Kuzmenko V.N. Complexity of One Packing Optimization Problem // *Cybernetics and Systems Analysis*. — 2016. — 52(1). — P. 76-84. DOI: 10.1007/s10559-016-9802-9.
4. Trofymchuk O.M., Vasyanin V.A., Kuzmenko V.N. Optimization Algorithms for Packing of Small-Lot Correspondence in Communication Networks // *Cybernetics and Systems Analysis*. — 2016. — 52(2). — P. 258-268. DOI: 10.1007/s10559-016-9822-5.
5. Vasyanin V.A., Trofymchuk O.M. Zadacha vyibora ierarhicheskoy strukturyi mnogoproduktovyoy kommunikatsionnoy seti s melkopartionnyimi diskretnymi potokami // *Ekologichna bezpeka ta prirodokoristuvannya: Zb. nauk. prats.* — Kyiv, 2012. — Vip. 10. — S. 182-204. (In Russian). <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/57543>.



6. Trofymchuk O.M., Vasyanin V.A. Simulation of Packing, Distribution and Routing of Small-Size Discrete Flows in a Multicommodity Network // Journal of Automation and Information Sciences. — 2015. — 47(7). — P. 15-30. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v47.i7.30.
7. Vasyanin V.A. Problem of Distribution and Routing of Transport Blocks with Mixed Attachments and Its Decomposition // Journal of Automation and Information Sciences. — 2015. — 47(2). — P. 56-69. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v47.i2.60.
8. Trofymchuk O.M., Vasyanin V.A. Kompyuternoe modelirovanie ierarhicheskoy strukturyi kommunikatsionnoy seti s diskretnyimi mnogoproduktovyimi potokami // USiM. — 2016. — N 2. — S. 48-57. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.15407/usim.2016.02.048>.
9. Vasyanin V.A. Kompyuternoe modelirovanie raspredeleniya i marshrutizatsii diskretnyih mnogoproduktovyih potokov v kommunikatsionnoy seti // USiM. — 2016. — N 3. — S. 43-53. DOI: <https://doi.org/10.15407/usim.2016.03.043>.

*Стаття надійшла до редакції 22.10.2019.*

# АНАЛІЗ, ОЦІНКА ТА ПРОГНОЗУВАННЯ В ЕКОНОМІЦІ

УДК 338.432 : 330.342

<https://orcid.org/0000-0002-9951-8867>

<https://orcid.org/0000-0002-4584-486X>

<https://orcid.org/0000-0001-8589-1604>

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

## УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ СТАЛОГО РОЗВИТКУ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ

***Анотація.** У статті розглянуто методичні підходи до комплексної оцінки рівня розвитку регіонів. Проведено аналіз поточного стану і сталого розвитку регіонів України за сформованою системою показників упродовж 2013–2017 років.*

***Ключові слова:** комплексна оцінка розвитку, сталий розвиток, регіони України.*

**DOI: 10.35350/2409-8876-2020-18-1-76-86**

### Вступ

Процеси глобалізації та децентралізації суттєво вплинули на підвищення ролі національних регіонів, проявом чого є набуття нових якостей регіонами, однією з яких є конкурентоспроможність, а також надання їм статусу самостійних суб'єктів, що формують власну стратегію розвитку в економічному просторі держави. В умовах сталого регіонального розвитку важливим завданням є забезпечення економічних, фінансових, соціальних і екологічних інтересів акторів усіх рівнів – від людини (нанорівня), домогосподарств, підприємств (мікрорівня) і соціальних груп, до територій і регіонів (мезорівня). Реалізація зазначеного завдання ускладнюється наявними протиріччями в цілях та устремліннях акторів, різновекторністю їх ціннісних установок, що робить неможливим узгодження всіх інтересів. Тому, дослідження напрямків вдосконалення механізмів управління сталим розвитком регіонів на мезорівні є досить суттєвою проблемою для економічної науки та управлінської практики. Особливої гостроти ця проблема набуває в період глобальної нестабільності, що переживає як світове, так і українське співтовариство.

### 1. Постановка проблеми

На вирішення цих питань повинно бути спрямовано управління сталим розвитком регіону, що характеризується різноманітністю функцій і вимагає

формування комплексу механізмів управління, відповідних складності регіональної соціально-економічної системи. Як першочергові заходи щодо забезпечення сталого розвитку регіональної економіки і соціальної сфери, намічені Кабінетом Міністрів України на найближчу перспективу, передбачені структурні зміни в економіці, стабілізація функціонування системоутворюючих організацій у ключових видах економічної діяльності, збалансованість ринку праці, досягнення позитивних темпів зростання і макроекономічної стабільності. Разом з тим, в результаті моніторингу реалізації проведених в регіонах заходів, спрямованих на забезпечення стійкості економіки, встановлена недосконалість наукового обґрунтування, як самих цих заходів, так і модернізації органів управління сталим розвитком територій.

Слід відмітити, що в регіонах залишається в повному обсязі нереалізований економічний потенціал, ростуть витрати на підтримку темпів розвитку виробництва, нейтралізацію викидів і скидів забруднюючих речовин, розміщення відходів виробництва і споживання, не забезпечується раціональне природокористування, оздоровлення навколишнього середовища і підвищення якості життя населення.

Можна зробити висновок про те, що сформувалося протиріччя між потребою в удосконаленні механізмів управління сталим розвитком регіонів країни та недостатньою розробленістю методології модернізації цих механізмів і формуванням відповідного інструментарію. У стабільному розвитку регіону зацікавлені всі актори: органи державної влади та місцевого самоврядування, організації бізнесу (крупного, середнього і малого), структури громадянського суспільства.

Таким чином, вирішення проблеми вдосконалення методів оцінки сталого розвитку регіонів під час переходу країни до інноваційної економіки в умовах глобальної економічної нестабільності набуває актуального науково-теоретичного і практичного значення.

## **2. Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Науковій розробці питань аналізу сталого розвитку регіонів за допомогою індикаторів стійкого соціально-економічного розвитку присвячені праці багатьох українських економістів, таких як В. Геєць, Б. Данилишин, В. Артеменко, М. Згуровський, Л. Мельник, В. Міщенко, М. Хвесик, В. Феденко, М. Шапочка, В. Шевчук та ін. [1–4]. Однак проблему вдосконалення методів оцінки сталого розвитку регіону з урахуванням умов економіки, інновацій та глобалізації досі не вирішено. Наявні в економічній літературі теоретичні розробки неповною мірою відображають реалії переходу до економіки інноваційного типу в умовах глобальної нестабільності. Практично не зачіпалися в даному аспекті проблеми діяльності регіональних органів влади як суб'єктів управління. Залишаються неопрацьованими теоретико-методологічні основи інституціонального забезпечення процесів сталого розвитку регіону. Існуючі моделі аналізу сталого розвитку регіону не цілком враховують складність регіональних соціально-економічних систем. Розроблені методики аналізу сталого розвитку регіону характеризуються трудомісткістю збору даних і низькою оперативністю проведення досліджень [5]. Таким чином, незважаючи на

вдалі організаційно-економічні рішення з питань сталого розвитку, представлені в різних наукових працях, цілісна комплексна методологія оцінки сталого розвитку регіону, що передбачає модернізацію його механізмів, в даний час не вибудувана.

### **3. Формулювання цілей статті**

Метою цієї статті є розроблення методичного підходу до комплексної оцінки сталого розвитку регіонів як цілісних соціально-економічних систем. Методологічну основу роботи складає системна парадигма, що комбінує і синтезує системний, відтворювальний та інституційний підходи.

### **4. Виклад основного матеріалу**

Для досягнення зазначеної мети було поставлено та вирішено задачу з дослідження найбільш важливих ключових інструментів оцінки сталого розвитку регіонів. Інструментарій механізму цілепокладання включає прогнози, плани і програми, використання яких в регіональному управлінні передбачає проведення послідовного аналізу ситуації в регіоні, її прогнозування, організацію та об'єктивне обґрунтування форм і методів узгодження інтересів між акторами регіону з метою більш ефективного використання соціально-економічного потенціалу.

Слід передбачити такі напрямки стратегічного (збалансованого, комплексного, системного і стійкого) розвитку регіонів країни:

- вдосконалення системи стратегічного і територіального планування, забезпечення взаємної узгодженості галузевого та територіального розвитку;
- усунення загроз національній безпеці, пов'язаних з диспропорцією розвитку регіонів;
- відновлення природних систем, забезпечення якості навколишнього середовища, необхідного для життя людини та сталого розвитку економіки.

Відомо, що стійкість є фундаментальною властивістю як соціально-економічних динамічних систем, так і природних. Її можна розглядати як незмінність певного стану системи, так і як здатність переходу будь-яких інших станів у даний (статична стійкість) і неперервність розвитку системи (динамічна стійкість). Поняття стійкості тісно пов'язане із здатністю системи повертатися в стан рівноваги після припинення зовнішніх впливів, що вивели її зі стану рівноваги, а також з поняттям стабільності.

Для підвищення економічної стійкості розвитку регіонів доцільно застосування актуальних інтеграційних технологій, сучасних інститутів розвитку, що використовуються у світовому співтоваристві, таких як кластерні моделі і території з особливим режимом господарювання. З метою поліпшення умов формування, використання, розвитку і заощадження людського потенціалу регіонів, що спричиняє підвищення соціальної стійкості в цих регіонах, доцільно проведення наступних заходів:

- 1) розробка середньострокових і довгострокових прогнозів ситуації на ринку праці, в тому числі включаючи оцінку потреби у випускниках початкової, середньої та вищої освіти, а також приведення обсягів та напрямів професійної підготовки і перепідготовки кадрів відповідно до потреб економіки;

- 2) стимулювання створення нових робочих місць;
- 3) сприяння самозайнятості населення, в тому числі в сільській місцевості, за рахунок створення малих підприємств сфери послуг, переробки місцевої сировини, реалізації програм мікрокредитування малого і середнього підприємництва;
- 4) створення умов для розвитку територіальної та професійної мобільності громадян, що проживають в регіонах;
- 5) створення умов для інтеграції в регіональний ринок праці іноземної робочої сили з урахуванням перспективних потреб економіки в трудових ресурсах;
- 6) підвищення ефективності професійного навчання та перенавчання населення за рахунок розвитку системи підготовки, перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів, включаючи розвиток внутрішньофірмового навчання і професійного навчання безробітних громадян.

На регіональному рівні необхідний розвиток нормативно-правової бази, яка передбачає застосування заходів, що забезпечують зниження антропогенного впливу на довкілля:

- заохочення використання енергоефективних та енергозберігаючих технологій, відновлювальних і альтернативних джерел енергії;
- стимулювання природоохоронної діяльності господарюючих суб'єктів;
- введення податкових і митних пільг для підприємств, що здійснюють діяльність, спрямовану на поліпшення екологічної ситуації, в тому числі діяльність по переробці відходів і скорочення викидів парникових газів в атмосферне повітря. На рис. 1 наведено комплекс факторів, що впливають на стійкий розвиток регіональної соціально-економічної системи.



Рисунок 1 – Фактори, що впливають на стійкий розвиток регіональної соціально-економічної системи

У роботі запропоновані такі методи вдосконалення механізмів управління сталим розвитком регіону з використанням комплексних (агрегованих) показників:

- організаційно-економічного механізму;
- програмно-цільового механізму;
- механізму соціального партнерства;
- механізму інноваційного розвитку;
- механізму зовнішньоекономічних і міжрегіональних зв'язків;

- кластерного механізму;
- механізму аналізу та оцінки сталого розвитку.

Для ефективного функціонування механізму територіального планування перспективними є такі інструменти:

- на державному рівні – узгодження розвитку інфраструктури, надання особливого статусу окремим територіям, пряма фінансова підтримка (субсидії, трансферти);
- на регіональному рівні – стратегічне планування з метою збалансування соціо-еколого-економічного розвитку, обмеження створення екологічно шкідливих підприємств в густонаселених районах;
- на місцевому рівні – міжмуніципальне співробітництво для об'єднання зусиль з метою прискорення розвитку.

Органам влади державного та регіонального рівня і органам місцевого самоврядування рекомендується використовувати щодо сталого розвитку регіону такі інструменти:

- моніторинг ходу реалізації планів і програм сталого розвитку;
- пряма фінансова підтримка інноваційних проектів;
- надання будинків та інших складових інфраструктури, в тому числі транспорту та зв'язку;
- підтримка у формуванні іміджу кластера;
- розвиток бізнес-інкубаторів.

Перспективними є наступні напрямки міжрегіональної взаємодії:

- створення координуючих органів (комісій, комітетів і рад з розвитку і координації співпраці, операторів міжрегіональних зв'язків, дирекцій і т.ін.);
- розвиток інфраструктури міжрегіонального співробітництва (будівництво міжрегіональних виставково-конгресних комплексів, культурних центрів та ін.);
- інформаційне забезпечення міжрегіонального співробітництва (створення міжрегіональних інформаційно-аналітичних систем, маркетингових центрів тощо);
- просування продукції і послуг на ринки інших регіонів (здійснення виставково-ярмаркової діяльності, проведення презентаційних заходів, поширення рекламно-інформаційної продукції, просування регіональних брендів і торгових марок товаровиробників і т.д.);
- здійснення спільних проектів (організація підприємств на основі різних форм кооперації, міжрегіональних зон випереджального розвитку, виробничо-територіальних кластерів), створення міжрегіональних інститутів розвитку інвестиційної спрямованості (інвестиційних, страхових, венчурних фондів, бізнес-альянсів, спільних інжинірингових центрів, міжрегіональних банків розвитку, клірингових і розрахункових центрів), наукових центрів у закладах вищої освіти з розробки ноу-хау тощо;
- науково-методичне забезпечення міжрегіонального співробітництва (проведення наукових досліджень, розробка методичних матеріалів з розвитку міжрегіональних зв'язків і т.п.);
- налагодження ділових і культурних контактів та зв'язків з іншими регіонами (участь в міжрегіональних форумах, виставках, фестивалях, конкурсах, проведення візитів делегацій з торгово-економічними і культурними місіями та ін.).

Формування інноваційної складової сталого розвитку регіону з урахуванням глобалізаційних трансформацій вимагає спільних цілеспрямованих зусиль органів державної влади, органів місцевого самоврядування, бізнесу та суспільства. В цьому разі доцільно поєднувати високоризиковану і високоприбуткову моногалузеву спеціалізацію з використанням інноваційних рішень, супроводжуваних ефектом масштабу, впровадженням ресурсозберігаючих безвідходних технологій, максимально використовуючи енергетичні та матеріальні відходи в якості вторинних ресурсів. Завдання залучення фінансових коштів в регіон вирішує маркетинговий механізм управління сталим розвитком регіону, в інструментарій якого входять брендинг, бенчмаркінг та корпоративна соціальна відповідальність господарюючих суб'єктів регіону.

Системна парадигма враховує положення, що містяться в класичних теоріях регіональної економіки, передбачає комплексний підхід до сталого розвитку регіону, який передбачає поєднання економічної, фінансової, соціальної, інституційної та екологічної стійкості. Реально система сталого розвитку регіону володіє нескінченним набором властивостей різної природи. Практично в процесі пізнання взаємодія здійснюється з обмеженою безліччю властивостей, що лежать в межах можливості їх сприйняття і необхідності для мети пізнання. Система задається на безлічі відібраних для спостереження властивостей. Процедура завдання оцінки сталого розвитку регіону включає ряд операцій: призначення змінних, параметрів і каналу спостереження.

## 5. Оцінка сталого розвитку регіонів

Кожній властивості системи призначається змінна, за допомогою якої підсумовується зміна проявів властивості. Безлічі спостережуваних проявів властивості ставиться у відповідність безліч значень змінної:

$$D: S_i = [S_{i,j}, j = \{1, N\}] \rightarrow Y_i = [Y_{i,j}, j = \{1, N\}], \quad (1)$$

де  $S_i$  –  $i$ -а властивість;  $Y_i$  – змінна.

Процедура спостереження властивостей системи сталого розвитку регіону включає базу і канал спостереження. Під базою спостереження розуміються ознаки розрізнення одного прояву властивості від іншого. Типовими базами є час, простір, група і їх комбінації. Операцію призначення значенням параметра значення змінної назвемо каналом спостереження. У цьому сенсі необхідно розрізняти чіткий і нечіткий канал спостереження.

Чіткий канал призначає одне значення параметра та одне значення змінної. У цьому випадку система задається на чіткій безлічі значень змінних. У непарному каналі спостереження не існує однозначного рішення про те, яке значення змінної призначити певному значенню параметра. Тому система сталого розвитку регіону задається у вигляді нечітких множин станів змінних (рис. 2).

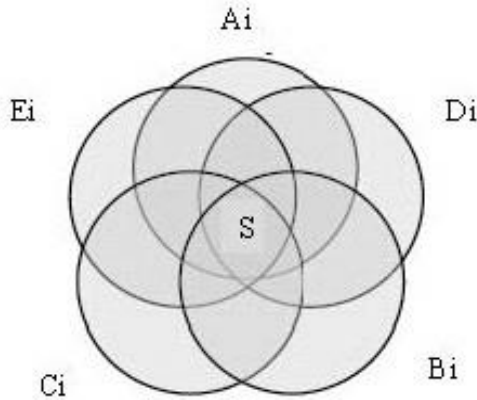


Рисунок 2 – Нечіткі множини станів змінних

Формально шлях до оцінки сталого розвитку регіону може бути представлений у вигляді безлічі:

$$S = (Y, T, R, Z), \tag{2}$$

де  $Y$  – безліч змінних;  $T$  – безліч параметрів;  $R$  – відносини на безлічі  $Y$  і  $T$ ;  $Z$  – мета досліджень.

Відносини між змінними і параметрами тут розуміються в самому широкому сенсі, включаючи як обмеження, зчеплення, з'єднання і т.д. В подальшому викладі матеріалу сенс відносин буде обмежений поняттями такого вигляду:

1) відносини еквівалентності, що має сенс «сусідства» значень змінних об'єкта на повній безлічі станів:

$$Y_1, j, Y_2, \dots, Y_k, n \quad P \in P_1, \tag{3}$$

де  $Y_{k,n}$  – значення  $k$ -ої змінної.

2) відносини впорядкованості змінних за роллю і вкладом в досягнення мети:

$$P_2 \subset Y \times Y. \tag{4}$$

3) відносини впорядкованості змінних на множині параметрів:

$$G \subset Y \times T. \tag{5}$$

4) відносини впорядкованості виду:

$$V \subset P_1 \times P_2 \times G. \tag{6}$$

Такий підхід можна виразити формулою:



$$S_i = \{A_i, B_i, C_i, D_i, E_i\}, \quad (7)$$

де  $S_i$  – безліч видів стійкості розвитку регіону.

Для оцінки економічного (індекс  $A_i$ ), фінансового (індекс  $B_i$ ), соціального (індекс  $C_i$ ), інституційного (індекс  $D_i$ ) та екологічного (індекс  $E_i$ ) стійкого розвитку регіону пропонується використовувати наступні формули:

$$A_i = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3, \quad (8)$$

де  $A_i$  – індекс економічної стійкості розвитку регіону;  $a_1$  – індекс промислового виробництва;  $a_2$  – індекс виробництва продукції сільського господарства;  $a_3$  – темп зростання відвантажених товарів власного виробництва, виконаних робіт і послуг власними силами на душу населення;

$$B_i = b_1 \cdot b_2 \cdot b_3, \quad (9)$$

де  $B_i$  – індекс фінансової стійкості розвитку регіону;  $b_1$  – коефіцієнт бюджетного покриття (співвідношення доходів і видатків бюджету регіону);  $b_2$  – темп зростання частки прибуткових підприємств і організацій;  $b_3$  – темп зростання відношення дебіторської заборгованості до кредиторської;

$$C_i = \frac{c_1 \cdot c_2 \cdot c_3}{c_4 \cdot c_5}, \quad (10)$$

де  $C_i$  – індекс соціальної стійкості розвитку регіону;  $c_1$  – темп зростання середньомісячної номінальної нарахованої заробітної плати працівників;  $c_2$  – темп зростання реальних грошових доходів;  $c_3$  – темп зростання обсягу платних послуг населенню в порівнянних цінах;  $c_4$  – темп зростання чисельності працюючих неповний робочий час з ініціативи роботодавця;  $c_5$  – темп зростання рівня безробіття;

$$D_i = \frac{d_1 \cdot d_2}{d_3 \cdot d_4 \cdot d_5}, \quad (11)$$

де  $D_i$  – індекс інституційної стійкості розвитку регіону;  $d_1$  – індекс фізичного обсягу інвестицій в основний капітал до відповідного місяця попереднього року;  $d_2$  – співвідношення сум, що надійшли від податків і зборів до суми нарахованих податків, зборів та інших обов'язкових платежів;  $d_3$  – темп зростання показника «зареєстровані злочини»;  $d_4$  – темп зростання показника «зареєстровані тяжкі та особливо тяжкі злочини»;  $d_5$  – темп зростання індексу споживчих цін на товари та послуги.

$$E_i = \frac{e_1 \cdot e_2}{e_3}, \quad (12)$$

де  $E_i$  – індекс екологічної стійкості розвитку регіону;  $e_1$  – темп зростання

поточних експлуатаційних витрат на охорону навколишнього середовища;  $e_2$  – темп зростання інвестицій в основний капітал, спрямованих на охорону навколишнього середовища та раціональне використання природних ресурсів;  $e_3$  – темп зростання викидів забруднюючих речовин в атмосферу.

Комплексний індекс стійкості розвитку регіону ( $W$ ), відповідно до загальної методології індексного методу, пропонується розраховувати як середнє геометричне окремих індексів за формулою:

$$W = \sqrt{A_i B_i C_i D_i E_i}. \quad (13)$$

В цьому разі для типологізації регіонів за рівнем стійкості розвитку приймаються наступні граничні значення переходу територій з одного стану в інший в частині стійкості розвитку:

1 – якщо комплексний індекс  $W > 1$  – стійкий розвиток регіону;

2 – якщо комплексний індекс  $W = 1$  – стагнація соціально-економічного розвитку регіону;

3 – якщо комплексний індекс  $W < 1$  – нестійкий розвиток регіону.

Запропонована методика оцінки стійкості соціально-економічного розвитку регіонів була апробована на прикладі різних регіонів України з використанням наступних джерел [6–13]. Результати застосування методики наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Комплексний індекс стійкості розвитку регіонів України

Області України	Рік					Середнє значення
	2013	2014	2015	2016	2017	
Вінницька	0,34	0,29	0,36	0,39	0,41	0,36
Дніпропетровська	1,66	1,27	1,33	1,29	1,45	1,40
Житомирська	0,31	0,14	0,16	0,26	0,33	0,24
Закарпатська	0,39	0,30	0,24	0,28	0,32	0,31
Запорізька	0,93	0,74	0,63	0,66	0,72	0,74
Київська	0,60	0,53	0,58	0,54	0,57	0,56
Львівська	0,63	0,56	0,43	0,49	0,54	0,53
Харківська	1,46	1,27	1,06	0,97	1,21	1,19

Конкурентоспроможними регіонами за досліджуваний період (2013–2017) є Дніпропетровська, Харківська, Запорізька, Київська і Львівська області. Рівень конкурентоспроможності інших регіонів має «перехідний» характер. Провідні місця в рейтингу за досліджуваний період посідають Дніпропетровська та Харківська області. За цими областями йдуть Запорізька, Київська та Львівська, що формують другу групу регіонів за рівнем конкурентоспроможності та замикають умовну групу лідерів. Далі йдуть Вінницька, Закарпатська та Житомирська області, які віднесено до групи з помірним рівнем конкурентоспроможності.

Отже, використання запропонованого методичного підходу дозволяє здійснювати комплексну оцінку рівня конкурентоспроможності регіонів, проводити моніторинг і визначати регіональний рейтинг за певний період та порівнювати конкурентоспроможність українських регіонів між собою.

## Висновки

Запропонований комплексний (агрегований) показник стійкого розвитку регіонів України задовольняє наступним вимогам:

- формування на основі показників, що вимірюють успіх в пріоритетних напрямках сталого розвитку;
- можливість кількісного виміру сталого розвитку регіону;
- облік основних складових розвитку: інституційної, екологічної, економічної та соціальної, фінансової.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Данилишин Б., Дорогунцов С., Міщенко В. Природно-ресурсний потенціал сталого розвитку України. Київ, РВПС України. 1999. 716 с.
2. Артеменко В. Індикатори стійкого соціально-економічного розвитку регіонів. Регіональна економіка. 2006. № 2. С. 90–97.
3. Аналіз сталого розвитку – глобальний і регіональний контексти: монографія у 2 ч. / Міжнар. рада з науки (ICSU) [та ін.]; наук. кер. М.З. Згуровський. Київ: НТУУ «КПІ», 2017. Ч. 2. Україна в індикаторах сталого розвитку. Аналіз. 2016.
4. Устойчивое развитие: теория, методология, практика: учебник под ред. проф. Л.Г. Мельника. Сумы: Университетская книга, 2009. 1216 с.
5. Про затвердження методики розрахунку інтегральних регіональних індексів економічного розвитку: Наказ Державного Комітету Статистики України від 15 квітня 2003 р. № 114 / Державний Комітет Статистики України.  
URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0114202-03/card3#Files> (дата звернення: 12.12.2019).
6. Структурні трансформації в економіці України: динаміка, суперечності та вплив на економічний розвиток: наукова доповідь / НАН України, ДУ «Ін-т екон. та прогноз. НАН України». Київ, 2015. 304 с.
7. Крючкова І.В. Фактори економічного зростання в Україні в 2016–2018 рр. Економіка і прогнозування. 2018. № 2. С. 29–47.
8. Економічні та фінансові показники України.  
URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/imf/Pokaz.html> (дата звернення: 12.12.2019).
9. Звіт про фінансову стабільність. НБУ.  
URL: <https://bank.gov.ua/stability/report> (дата звернення: 12.12.2019).
10. Зайняте населення за видами економічної діяльності та регіонами. Офіційний сайт Державної служби статистики України. 2017.  
URL: <http://www.ukrstat.gov.ua> (дата звернення: 12.12.2019).
11. Динаміка заробітної плати у 2017–2018 рр. ДССУ.  
URL: <http://www.ukrstat.gov.ua> (дата звернення: 12.12.2019).
12. Індекс споживчих цін. ДССУ.  
URL: [http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu\\_u/cit.htm](http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/cit.htm) (дата звернення: 12.12.2019).
13. Аналітична доповідь до Щорічного Послання Президента України до Верховної Ради України «Про внутрішнє та зовнішнє становище України в 2018 році». Київ : НІСД, 2018. 688 с.

## REFERENCES

1. Danylyshyn, B., Dorohuntsov, S., Mishchenko, V. (1999). Pryrodno-resursnyi potentials staloho rozvytku Ukrainy [Natural resource potential of sustainable development of Ukraine]. Kyiv : RVPS Ukrainy, 716 s. (In Ukrainian).

2. Artemenko, V. (2006). Indykatory stiikoho sotsialno-ekonomichnoho rozvytku rehioniv. Rehionalna ekonomika. [Indicators of sustainable socio-economic development of regions. Regional economy]. № 2, 90–97. (In Ukrainian).
3. Analiz staloho rozvytku – hlobalnyi i rehionalnyi konteksty [Sustainable development: theory, methodology, practice]: monohrafiia u 2 ch. (2017). Mizhnar. rada z nauky (ICSU) [ta in.]; nauk. ker. M.Z. Zghurovskiy. Kyiv : NTUU «KPI». Ch. 2. Ukraina v indyikatorakh staloho rozvytku. Analiz. [Ukraine in sustainable development indicators. Analysis]. (2016). (In Ukrainian).
4. Ustojchivoe razvitie: teoriya, metodologiya, praktika. [Sustainable development: theory, methodology, practice]. (2009). Uchebnik pod red. prof. L.G. Melnika. Sumy : Universitetskaya kniga, 1216 s. (In Russian).
5. Pro zatverdzhennia metodyky rozrakhunku intehralnykh rehionalnykh indeksiv ekonomichnoho rozvytku. [On approval of the methodology for calculating integrated regional economic development indices]. (2003). Nakaz derzhavnoho komitetu statystyky Ukrainy vid 15 kvitnia 2003 r. № 114 / Derzhavnyi komitet statystyky Ukrainy. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0114202-03/card3#files>.
6. Strukturni transformatsii v ekonomitsi Ukrainy: dynamika, superechnosti ta vplyv na ekonomichnyi rozvytok. [Structural transformations in the Ukrainian economy: dynamics, contradictions and impact on economic development]. (2015). Naukova dopovid. NAN Ukrainy, DU «In-t ekon. ta prohnozuv. NAN Ukrainy». Kyiv, 304 s. (In Ukrainian).
7. Kriuchkova, Y.V. (2018). Faktory ekonomichnoho zrostannia v Ukraini v 2016–2018 rr. Ekonomika i prohnozuvannia. [Economic growth factors in Ukraine in 2016–2018 Economics and forecasting]. № 2, 29–47. (In Ukrainian).
8. Ekonomichni ta finansovi pokaznyky Ukrainy. [Economic and financial indicators of Ukraine]. Retrieved from <http://www.ukrstat.gov.ua/imf/pokaz.html>. (In Ukrainian).
9. Zvit pro finansovu stabilnist. [Financial Stability Report]. NBU. Retrieved from <https://bank.gov.ua/stability/report>. (In Ukrainian).
10. Zainiate naselennia za vydamy ekonomichnoi diialnosti ta rehionamy. [Employed population by type of economic activity and region]. (2017). Ofitsiyni sait derzhavnoi sluzhby statystyky Ukrainy. Retrieved from <http://www.ukrstat.gov.ua> (In Ukrainian).
11. Dynamika zarobitnoi platy u 2017–2018 rr. [The dynamics of wages in 2017–2018]. DSSU. Retrieved from <http://www.ukrstat.gov.ua> (In Ukrainian).
12. Indeks spozhyvchykh tsin. [Consumer Price Index.]. DSSU. Retrieved from [http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu\\_u/cit.htm](http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/cit.htm) (In Ukrainian).
13. Analitychna dopovid do Shchorichnoho Poslannia Prezydenta Ukrainy do Verkhovnoi Rady Ukrainy «Pro vnutrishnie ta zovnishnie stanovyshche Ukrainy v 2018 rotsi». [Analytical report to the annual message of the president of Ukraine to the Verkhovna Rada of Ukraine "On internal and external situation of Ukraine in 2018"]. (2018). Kyiv : NISD, 688 s. (In Ukrainian).

*Стаття надійшла до редакції 24.01.2020.*

**Д.В. СТЕФАНИШИН**

## **ПРО МОДЕЛЮВАННЯ ТА КІЛЬКІСНЕ ОЦІНЮВАННЯ СОЦІАЛЬНОГО РИЗИКУ ПЛАНОВАНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ, ПОВ'ЯЗАНОЇ З ПІДПРИЄМСТВОМ ДЕРЕВООБРОБНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ В С. ГОРОДОК, РІВНЕНСЬКОЇ ОБЛАСТІ**

***Анотація.** В статті проаналізовано результати кількісного оцінювання соціального ризику планованої діяльності, пов'язаної з підприємством деревообробної промисловості в с. Городок, Рівненської області, які було представлено в звіті з оцінки впливу на довкілля планованої діяльності, визначеної як «Реконструкція промислового комплексу будівель і споруд під підприємство деревообробної промисловості». Звіт було розроблено Товариством з обмеженою відповідальністю «Технопривід Інвест Груп», як суб'єктом господарювання, яке представляло на момент процедури оцінки впливу на довкілля інтереси відомої міжнародної корпорації «Кроноспан». Поданий звіт з оцінки впливу на довкілля пройшов встановлену Законом України «Про оцінку впливу на довкілля» процедуру, за результатами якої територіальним органом в особі департаменту екології та природних ресурсів Рівненської обласної державної адміністрації було надано висновок про допустимість планованої діяльності. В результаті проведеного аналізу наведеної в звіті кількісної оцінки соціального ризику, отриманої згідно з прийнятою моделлю, встановлено невідповідність цієї оцінки об'єктивним даним, зокрема про стан соціуму, який може зазнати негативного впливу.*

***Ключові слова:** оцінка впливу на довкілля, планована діяльність, ризик розвитку індивідуальних канцерогенних ефектів, соціальний ризик.*

**DOI: 10.35350/2409-8876-2020-18-1-87-101**

### **Вступ**

Згідно з прийнятим 23 травня 2017 р. Законом України «Про оцінку впливу на довкілля» [1] (далі – Закон про ОВД, Закон) здійснюється процедура оцінки впливу на довкілля (ОВД). Її метою є «запобігання надмірної шкоди довкіллю, забезпечення екологічної безпеки, охорони навколишнього середовища, раціонального використання і відтворення природних ресурсів, у процесі прийняття рішень про провадження господарської діяльності, яка може мати значний вплив на довкілля (види планованої діяльності та об'єкти, що підлягають ОВД, встановлюються Законом, стаття 3). За цією процедурою (див. статтю 2 Закону) суб'єкт господарювання зобов'язаний підготувати звіт з оцінки впливу на довкілля (звіт з ОВД, див. статтю 6 Закону), а відповідний уповноважений центральний чи територіальний орган (стаття 5 Закону) має проаналізувати інформацію, надану суб'єктом господарювання у звіті, будь-яку додаткову до звіту інформацію, а також інформацію, що надійшла від громадськості у встановленому Законом порядку під час громадського обговорення, та за результатами аналізу надати висновок про допустимість (чи недопустимість) проведення планованої діяльності (стаття 9 Закону).

Серед обов'язкової інформації, яка має включатися в звіт з ОВД, і за достовірність якої несе відповідальність згідно з чинним законодавством суб'єкт господарювання (стаття 6 Закону [1]), окремим пунктом (розділом у звіті) проходить «опис і оцінка можливого впливу на довкілля планованої діяльності, зокрема величини та масштабів такого впливу (площа території та чисельність населення, які можуть зазнати впливу), характеру (за наявності – транскордонного), інтенсивності і складності, ймовірності, очікуваного початку, тривалості, частоти і невідворотності впливу (включаючи прямий і будь-який опосередкований, побічний, кумулятивний, транскордонний, короткостроковий, середньостроковий та довгостроковий, постійний і тимчасовий, позитивний і негативний вплив), зумовленого», зокрема, «ризиками для здоров'я людей, об'єктів культурної спадщини та довкілля, у тому числі через можливість виникнення надзвичайних ситуацій».

Як відомо, завдання з оцінювання ризиків, особливо кількісного, незалежно від генезису ризиків (природні, техногенні, екологічні, економічні, політичні тощо), масштабів їх прояву, використання результатів оцінювання в процесах прийняття рішень в різних сферах діяльності людини (в страховій справі, природокористуванні, техніці, менеджменті тощо), є надзвичайно складними інтелектуальними завданнями. Адекватне вирішення таких завдань потребує як високопрофесійних умінь, так і прозорості в оцінках, щоб не допускати різного роду маніпуляцій та перекручень [2-11]. Зважаючи на складність задач з ризиком, на практиці, в процесах ОВД при оцінці ризиків, зазвичай використовують спрощені формалізовані підходи та моделі, що ґрунтуються на використанні статистичних даних. Зокрема, такий підхід до оцінювання ризику для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря знайшов своє відображення і в чинних Методичних рекомендаціях МР 2.2.12-142-2007 [12]. При цьому виникає ряд питань як щодо адекватності методів та моделей кількісної оцінки ризику для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря, як загрози, що є актуальною практично в усіх видах планованої діяльності, на які поширюються вимоги Закону [1], так і щодо об'єктивності вихідних даних та коректності застосування цих методичних рекомендацій розробниками ОВД при розв'язанні практичних задач з оцінки ризиків в особливо відповідальних випадках, коли планована діяльність може нести значну небезпеку для здоров'я людей.

## **1. Деякі загальні зауваження**

Дослідження ризиків, пов'язаних з потенційно небезпечними для життя і здоров'я людей технологіями та діяльністю, актуалізувалися після глобальної економічної кризи 70-х років минулого століття. Суспільство почало звертати увагу на те, як розподіляються затрати на небезпечні технології, чи йдуть вони і на підвищення безпеки, та наскільки ефективними є засоби контролю й забезпечення техногенної безпеки. Прийшло усвідомлення того, що шкода від надмірного забруднення довкілля та збитки від техногенних аварій безпосередньо відбиваються на життєдіяльності і добробуті людей, що несправедливо, коли перевагами небезпечних технологій користується одна частина населення, тоді як ризикує інша [13]. Саме в цей час активно почало розвиватися страхування; категорію «безцінності» життя і здоров'я людини поступово витіснила категорія їх ціни [14-16]. Власне звідси і з'явилась

потреба в максимально об'єктивному кількісному оцінюванні ризиків для життя і здоров'я як працівників, задіяних на потенційно небезпечних виробництвах, так і населення, яке проживає в зоні потенційних впливів небезпечних виробництв. Багато в чому, саме через прийнятність для практичного використання кількісних оцінок ризиків в роботі провідних страхових фірм слід розглядати їх адекватність і коректність. Страхові фірми спеціалізуються на використанні ризику в своїй господарській діяльності і вони якнайбільше зацікавлені в об'єктивності та прозорості оцінок ризику.

Етимологічно в понятті «ризик» концентрується виклик з боку людини небезпеці, можливим збиткам, втратам, або ж, навпаки, від небезпеки, загрози, їх наслідків – для людини. Тому відповідь на питання, в якій мірі для сучасної людини ризик є свідомим вибором, аніж жеребом, в умовах небезпеки, є ключовою відповіддю для розуміння актуальності проблем, пов'язаних з його дослідженнями на сучасному етапі розвитку суспільства.

Науку про ризик започаткували роботи математиків, які вирішували складні комбінаторні задачі, пов'язані з прийняттям рішень азартними гравцями. Серед них такі всесвітньо відомі вчені, як А. Арно, Д. Бернуллі, Г. Галілей, Ж.-Л. Д'Аламбер, Дж. Кардано, П.-С. Лаплас, Г.В. Лейбніц, А. де Муавр, Б. Паскаль, П. Ферма та ін.

Різноманітні аспекти ризику в сучасних умовах (екологічні, економічні, математичні, психологічні, техногенні, соціальні, філософські тощо) в прикладних задачах аналізу та оцінювання ризиків в різних сферах діяльності людини та в різні роки досліджували такі фахівці, як А.П. Альгін, В.В. Вітлінський, Ю.Л. Забулонов, А.Б. Качинський, О.М. Ларічев, В.А. Легасов, Г.В. Лисиченко, Ц.Є. Мірцхулава, А.А. Музалевський, Е. Мушик і П. Мюллер, Я.С. Наконечний, В.А. Ойгензихт, І.О. Рябінін, Г.А. Хміль, А.С. Шапкін, О.І. Ястремський, P.L. Bernstein, V. Covello, J. Fiksel, J. Fussell, E.J. Henley, H. Kumamoto, H.M. Markowitz, V.C. Marshall, N. Rasmussen, P.F. Ricci, W. Rowe, P. Slovic, C. Starr, N.N. Taleb та інші.

Існує кілька загально визнаних принципів, які сприяють забезпеченню коректності і адекватності кількісного оцінювання (вимірювання) ризику та об'єктивності отриманих при цьому оцінок ризику.

Вирішальне значення при кількісному оцінюванні ризику може мати контекст поставленої задачі. Якщо, наприклад, мова йде про порівняння альтернатив за ризиком, з вибором серед них найменш ризикованої, то, насамперед, важливо забезпечити належний аналіз чинних факторів ризику, об'єктивність даних, які їх описують, та використовувати однакові підходи, методи і моделі при оцінюванні ризиків, пов'язаних з цими альтернативами (див., наприклад, [17]). Оцінювання ризиків з метою порівняння альтернатив є однією з найбільш поширених задач, при вирішенні яких існує принципова можливість забезпечити коректне використання отриманих оцінок ризику.

Для об'єктивності прогнозних значень (оцінок) ризику при кількісному його оцінюванні (значень апостеріорного ризику) не можуть ігноруватися емпіричні (або ж статистичні) ймовірності відповідних подій або ж апіорні ризики. В багатьох випадках саме вони слугують базою для моделювання та оцінювання ризику на основі екстраполяцій [2, 11, 18] і від того, наскільки повно і коректно вони використовуються, залежить адекватність прогнозних оцінок ризику [19]. Статистичні оцінки можуть слугувати і в якості основи для верифікації ризиків, отриманих аналітичними методами [19].

Результати оцінювання ризику різними методами, на основі різних моделей, отримані за однакових умов (даних), можуть різнитися, в тому числі і суттєво [18, 19]. Однак, якщо кількісне оцінювання ризику здійснюється різними дослідниками одним і тим же методом, за однакових умов, то різні значення ризику можуть вказувати на некоректність розв'язання задачі одним з дослідників, маніпуляцію вхідними даними тощо – з метою отримання «прийнятних» результатів.

Завжди бажаною є всесторонність (системність) і вичерпність аналізу і оцінки ризику. Важливо, щоб задіяні при цьому аналітичні чи будь-які інші оціночні процедури базувались на системному аналізі [2-11], щоб вони були відкритими та неупередженими [13-16] відносно справжнього стану технічної системи і довілля, продуцентів та реципієнтів ризику, були максимально прозорими відносно використання методів та моделей, вхідної інформації та результатів розрахунків, погоджувались з наявними статистичними даними і були захищені формальними математичними моделями (імовірнісними, логіко-імовірнісними тощо) і, що особливо важливо, коли використовуються так звані «нормативні» підходи, методи та моделі (див., наприклад, [12]), які рекомендуються відповідними інструкціями, актами тощо – об'єктивними (несуперечливими, достовірними) вхідними даними.

При оцінюванні індивідуальних чи соціальних ризиків для здоров'я і життя людей мають виділятися групи реципієнтів добровільного (наприклад, куріння, власний автомобіль, професія тощо) і недобровільного ризику (нав'язаного місцевим жителям планованою потенційно небезпечною діяльністю). Це абсолютно різні ризики. Добровільний ризик компенсується априорі; зокрема, якщо він професійний, то – за рахунок оплати праці на небезпечному виробництві, і, зазвичай, сприймається людьми толерантно, інколи навіть невинувато толерантно. Недобровільний ризик, якщо він не компенсується, може сприйматися людьми нетолерантно, породжувати паніку, неприйняття діяльності, навіть якщо вона є помірно шкідливою.

Індивідуальні ризики (професійна діяльність, шкідливі звички, спорт тощо, чоловіки і жінки, дорослі і діти) завжди різняться і в принципі не можуть бути подібними, навіть якщо окремі індивідууми знаходяться під дією одного і того ж продуцента ризику, в одній і тій же точці простору і в один і той же момент часу. Для оцінювання індивідуальних ризиків врахування просторового фактору полягає як у врахуванні різної віддаленості від джерела забруднення, так і різних концентрацій забруднень.

Соціальний ризик насамперед пов'язується з кількістю жертв. Тому результатами оцінки соціального ризику зазвичай є так звані криві ризику (діаграми «частота – наслідок» або «ймовірність – наслідок»), де наслідком є кількість постраждалих, летальних випадків тощо [3, 5, 10]. При цьому чим більшою прогнозується кількість постраждалих (або тих, хто ризикує), тим меншою має бути ймовірність відповідного наслідку, щоб ризик сприймався людьми толерантно (вважався прийнятним). Відповідно, при оцінюванні соціального ризику коректно має оцінюватися як ймовірність небезпечної події чи небезпечного стану, або, наприклад, індивідуальний ризик [12], так і кількість потенційних реципієнтів ризику (хто ризикує). Якщо, наприклад, літак може прийняти на борт 100 пасажирів, то, незалежно від того, скільки пасажирів в середньому перевозить авіакомпанія за один рейс, кількість потенційних реципієнтів ризику серед пасажирів має становити 100 осіб.



Кількість жителів в населеному пункті (або пунктах), здоров'ю яких загрожує планована діяльність, має встановлюватися не за даними, наведеними у Вікіпедії чи в будь-якому іншому доступному літературному джерелі, а за статистичними даними, які надає відповідний державний орган. При цьому, якщо мова йде про плановану діяльність в населеному пункті, яка має здійснюватися протягом значного періоду часу (наприклад, протягом кількох десятків років), то мають також прогнозуватися соціально-демографічні зміни в цьому населеному пункті на перспективу, згідно з моделями його соціального розвитку тощо, навіть якщо поряд з ризиками здоров'ю людей не враховуються й інші соціальні ризики, в тому числі й такі, наприклад, як нове безробіття, евакуація населення на випадок аварій тощо [5, 20].

## **2. Постановка задачі досліджень та мета статті**

Основною задачею наших досліджень ми визначили аналіз результатів кількісного оцінювання соціального ризику планованої діяльності, пов'язаної з підприємством деревообробної промисловості в с. Городок, Рівненського району, Рівненської області, які було представлено в звіті з оцінки впливу на довкілля планованої діяльності, визначеної як «Реконструкція промислового комплексу будівель і споруд під підприємство деревообробної промисловості за адресою: Рівненська область, Рівненський район, с. Городок, вул. Барона Штейнгеля, 4а» (номер справи 20198144297) [21].

Звіт з ОВД готувався Товариством з обмеженою відповідальністю (ТОВ) «Технопривід Інвест Груп» [21], як суб'єктом господарювання, яке представляло на момент здійснення процедури оцінки впливу на довкілля інтереси відомої міжнародної корпорації «Кроноспан» [22]. Безпосередній виконавець звіту з ОВД – ТОВ «АБМК», м. Львів [23]. Ним же виконувалося оцінювання соціальних ризиків, пов'язаних з планованою діяльністю. Звіт підписано генеральним директором ТОВ «АБМК» (П.Л. Підсаднюк) та директором ТОВ «Технопривід Інвест Груп» (П.С. Пильтяй).

Поданий ТОВ «Технопривід Інвест Груп» звіт з ОВД пройшов встановлену Законом з ОВД [1] процедуру (див. [21]), за результатами якої територіальним органом в особі департаменту екології та природних ресурсів Рівненської обласної державної адміністрації [24] було надано висновок про допустимість планованої діяльності (висновок підписали в.о. начальника відділу оцінки впливу на довкілля О.Ю. Данчук та директор департаменту В.В. Захарчук) (див. [21]). При цьому у висновку, без зауважень, було підтверджено отриману при ОВД оцінку соціального ризику.

Метою цієї статті є інформування науковців, розробників звітів з ОВД, екологів, громадськості, посадовців, політиків та інших зацікавлених осіб про результати проведеного нами аналізу матеріалів, що мають відношення до розв'язання задачі кількісного оцінювання соціального ризику планованої діяльності, представленої в звіті з ОВД [21], та про суперечливі моменти, які можуть свідчити про недостатню об'єктивність наведених у звіті оцінок.

## **3. Викладення основних положень статті**

Кількісне оцінювання (оцінка) соціального ризику для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря з врахуванням канцерогенних ефектів,

результати якого наведено в звіті з ОВД планованої діяльності, визначеної як «Реконструкція промислового комплексу будівель і споруд під підприємство деревообробної промисловості за адресою: Рівненська область, Рівненський район, с. Городок, вул. Барона Штейнгеля, 4а» (номер справи в єдиному реєстрі 20198144297) [21], здійснювалося згідно з чинними Методичними рекомендаціями МР 2.2.12-142-2007 [12], розробленими Міністерством охорони здоров'я (МОЗ) України і затвердженими Наказом МОЗ України від 13.04.2007 № 184. Альтернативні розрахунки соціального ризику, з метою об'єктивного, неупередженого і прозорого порівняння результатів, здійснювалися за одними і тими ж залежностями, наведеними в звіті з ОВД планованої діяльності [21], при одних і тих же значеннях площі, віднесеної під об'єкт планованої діяльності, та площі об'єкта з санітарно-захисною зоною, одних і тих же розрахункових концентрацій канцерогенних речовин та з врахуванням одних і тих же забруднюючих речовин, здатних викликати канцерогенні ефекти, встановлених в звіті з ОВД [21].

Застереження та відповідні корегування стосувалися лише найбільш загальних соціологічних даних щодо кількості осіб, що перебувають під ризиком, і, певною мірою, щодо соціально-демографічних даних.

### 3.1. Залежності, що використовувалися при оцінюванні соціального ризику планованої діяльності

Соціальний ризик  $R_s$ , чол./рік, планованої діяльності визначався як «ризик групи людей, на яку може вплинути впровадження об'єкта планованої діяльності, та особливостей природно-техногенної системи» [21]. Значення соціального ризику планованої діяльності від забруднення атмосферного повітря (для канцерогенних ефектів) встановлювалось за формулою [21]:

$$R_s = CR_a \cdot V_u \cdot \frac{N}{T} \cdot (1 - N_p), \quad (1)$$

де  $CR_a$  – індивідуальний канцерогенний ризик від комбінованої дії декількох канцерогенних речовин, що забруднюють атмосферу;  $V_u$  – уразливість території до забруднення атмосферного повітря (відношення площі, віднесеної під об'єкт планованої діяльності, до площі об'єкта з санітарно-захисною зоною);  $N$  – чисельність населення, що ризикує внаслідок планованої діяльності, чол.;  $T$  – середня тривалість життя у відповідному соціумі, роки;  $N_p$  – коефіцієнт зайнятості для планованої діяльності (відношення кількості додаткових робочих місць  $N_a$ , чол., до чисельності населення  $N$ , чол., що ризикує:  $N_p = N_a / N$ ).

Значення канцерогенного ризику  $CR_a$  оцінювалось згідно з формулою:

$$CR_a = \sum_i ICR_i, \quad (2)$$

де  $ICR_i$  – канцерогенний ризик для  $i$ -ї канцерогенної речовини:

$$ICR_i = C_i \cdot UR_i, \quad (3)$$

де  $C_i$  – розрахункова концентрація  $i$ -ї канцерогенної речовини, мг/м<sup>3</sup>;  $UR_i$  – одиничний канцерогенний ризик відповідної речовини, мг/м<sup>3</sup>:

$$UR_i = \frac{SF_i}{M_b \cdot W_a}, \quad (4)$$

де  $SF_i$  – фактор канцерогенного потенціалу, який встановлювався згідно з додатком до п. 4.3.2 Методичних рекомендацій [12], в залежності від забруднюючої речовини, мг/кг·доба;  $M_b$  – розрахункова маса тіла людини, що ризикує внаслідок планованої діяльності, кг;  $W_a$  – розрахункове значення добового споживання нею повітря, м<sup>3</sup>.

### 3.2. Дані, що використовувалися при оцінці соціального ризику

Соціальний ризик планованої діяльності оцінювався з врахуванням дії наступних забруднюючих речовин, здатних викликати канцерогенні ефекти протягом життя людини: формальдегід; хром шестивалентний; бенз(а)пірен. Загальну характеристику канцерогенного потенціалу, пов'язаного з цими речовинами в результаті здійснення планованої діяльності, подано в табл. 1. Значення розрахункових концентрацій відповідних забруднюючих речовин прийнято за даними звіту з ОВД планованої діяльності [21].

Таблиця 1 – Загальна характеристика канцерогенного потенціалу забруднюючих речовин від планованої діяльності, визначених в звіті з ОВД [21] як такі, що здатні викликати канцерогенні ефекти

Речовина	Розрахункова концентрація, $C_i$ , мг/м <sup>3</sup> [21]	Фактор $SF_i$ , мг/кг·доба [12, 21]
Формальдегід	0,01688	0,046
Хром шестивалентний	0,000000413	42
Бенз(а)пірен	0,000003	3,1

Площа території, віднесеної під об'єкт планованої діяльності, та площа об'єкта з санітарно-захисною зоною були встановлені в звіті з ОВД рівними таким величинам, відповідно: 640 000 м<sup>2</sup> та 710 650 м<sup>2</sup>. Коефіцієнт уразливості території до забруднення атмосферного повітря  $V_u$  було визначено рівним 0,9. Інші вихідні дані, що використовувались при оцінюванні соціального ризику планованої діяльності, для зручності порівняння значень, прийнятих в звіті з ОВД [21] та при проведених нами альтернативних розрахунках соціального ризику, представлено в табл. 2.

Таблиця 2 – Дані для кількісного оцінювання соціального ризику  
планованої діяльності

Найменування характеристики	Числові значення характеристик		
	Звіт з ОВД [21]	Альтернативні розрахунки	
		Для с. Городок	Імітаційне моделювання
Чисельність населення, що ризикує, $N$ , чол.	2719*	5348**	2000-25000***
Середня тривалість життя $T$ , роки	70	70	70
Чисельність додаткових робочих місць $N_a$	400	200****	Фактор не враховується
Коефіцієнт зайнятості для планованої діяльності $N_p$	0,147	0,037	0
Розрахункова маса тіла людини $M_b$ , кг	70*****	60*****	60
Споживання повітря людиною $W_a$ , м <sup>3</sup> /доба	20	20	20
Індивідуальний канцерогенний ризик $CR_a$	$5,7 \cdot 10^{-7}$	$6,7 \cdot 10^{-7}$	$6,7 \cdot 10^{-7}$

\* чисельність населення с. Городок, що відповідає даним Вікіпедії;

\*\* чисельність населення с. Городок згідно листа Управління охорони здоров'я при Рівненській обласній державній адміністрації (УОЗ РОДА), надісланого на запит депутата Рівненської міської ради І.С. Пилипчук від 11.01.2020 р.;

\*\*\* в тому числі з врахуванням можливого впливу на жителів інших населених пунктів (с. с. Обарів, Ставки, Понебель, Карпилівка, Великий Олексин, мікрорайони м. Рівне), розташованих навколо площадки планованої діяльності (рис. 1) (див. також додатковий матеріал до звіту з ОВД [21]);

\*\*\*\* озвучена на громадських обговореннях звіту з ОВД [21] кількість безпосередніх працівників підприємства;

\*\*\*\*\* «стандартна» маса дорослого чоловіка;

\*\*\*\*\* розрахункова маса тіла людини, рекомендована в якості фактора експозиції Всесвітньою організацією охорони здоров'я (ВООЗ) [12].

Чисельність додаткових робочих місць  $N_a$ , як фактор, що «понижує» соціальний ризик від забруднення атмосферного повітря (для канцерогенних ефектів) внаслідок планованої діяльності, при імітаційному моделюванні (альтернативні розрахунки ризику) не враховувалась з наступних причин.

1. Модель (1) (для канцерогенних ефектів) припускає, що зайнятість на підприємстві, діяльність якого пов'язана з забрудненням атмосферного повітря, здатна зменшувати відповідний соціальний ризик для місцевих жителів. Таке припущення може вважатися коректним лише у випадку, коли місцеві жителі, як працівники підприємства, жодним чином не потерпають від дії забруднюючих речовин (працюють і живуть в іншому місці).

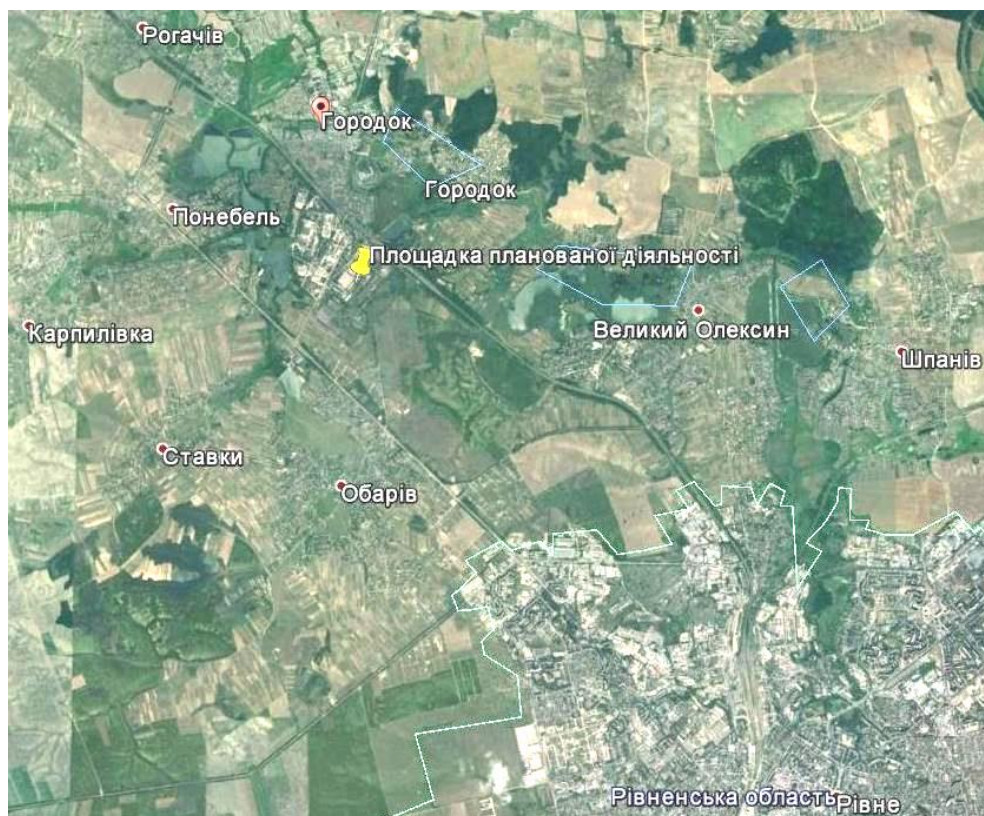


Рисунок 1 – Ситуаційна карта, з населеними пунктами, що оточують площадку планованої діяльності (карти Google Earth)

2. Канцерогенний ризик  $CR_d$  для працівників підприємства, діяльність якого пов'язана з забрудненням атмосферного повітря (для канцерогенних ефектів), зазвичай є більшим, ніж для представників місцевого населення тієї ж соціальної групи (наприклад, для дорослих чоловіків). Єдине, що реально відрізняє ці дві групи – це поведінкове ставлення до ризику. Для працівників ризик вважається добровільним, для місцевих жителів, що не є працівниками підприємства, – може бути недобровільним (насправді і є саме таким).

3. Модель  $R_S$  (1) припускає, що використання в якості робочої сили на підприємстві, діяльність якого пов'язана з забрудненням атмосферного повітря (для канцерогенних ефектів), всього населення, що ризикує внаслідок цієї діяльності (включно малолітніх дітей, непрацездатних тощо), може звести відповідний соціальний ризик до нуля, що, звичайно, не так.

При оцінці допустимості соціального ризику та з метою верифікації результатів оцінювання соціального ризику планованої діяльності до уваги приймалися також статистичні дані щодо захворюваності на онкологічні хвороби жителів для с. Городок та для подібних за кількістю мешканців сіл Рівненського району, розташованих на околиці м. Рівне: с. Колоденка (на південний схід від міста) та с. Біла Криниця (на схід від міста). Поблизу цих сіл, на відміну від с. Городок, біля якого вже працює підприємство хімічної промисловості (ПАТ «Рівнеазот» OSTCHEM), подібні підприємства відсутні.

Дані наведено нижче в табл. 3. Кількісні характеристики захворюваності було надано листом УОЗ РОДА, підписаним заступником начальника управління І.Я. Добровольським, за запитом депутата Рівненської міської ради І.С. Пилипчук від 11.01.2020 р.

Таблиця 3 – Статистичні дані щодо захворюваності на онкологічні хвороби жителів сіл Рівненського району

Населений пункт	Дані УОЗ РОДА		Статистична оцінка соціального ризику захворюваності на онкологічні хвороби $\hat{R}_S^*$ , чол./рік
	Кількість жителів $N$ , чол.	Кількість онкохворих $n$ , чол.	
с. Городок	5348	40	$1,1 \cdot 10^{-4}$
с. Колоденка	4870	33	$9,7 \cdot 10^{-5}$
с. Біла Криниця	7185	52	$10^{-4}$

\* Статистична оцінка соціального ризику захворюваності на онкологічні хвороби визначалася згідно з формулою:

$$\hat{R}_S = \frac{n}{N \cdot T}, \quad (5)$$

де  $T = 70$  – середня тривалість життя у відповідному соціумі, роки.

### 3.3. Отримані результати та їх аналіз

В звіті з ОВД [21] була розрахована і оприлюднена оцінка соціального ризику планованої діяльності  $R_S = 1,7 \cdot 10^{-5}$ , чол./рік.

Ця оцінка порівнювалася з допустимими значеннями для різних рівнів соціального ризику, визначених як [21]: «прийнятний» (менше  $10^{-6}$ , чол./рік); «умовно прийнятний» ( $10^{-4} \div 10^{-6}$ , чол./рік); «прийнятний для професійних контингентів і неприйнятний для населення» ( $10^{-3} \div 10^{-4}$ , чол./рік); «неприйнятний для професійних контингентів» (більше ніж  $10^{-3}$ , чол./рік).

За результатами порівняння соціальний ризик для населення с. Городок від забруднення атмосферного повітря (для канцерогенних ефектів протягом життя людини) внаслідок планованої діяльності було визнано як «умовно прийнятний», що було підтверджено у висновку департаменту екології та природних ресурсів Рівненської обласної державної адміністрації [21].

В результаті виконаного нами альтернативного розрахунку соціального ризику планованої діяльності для с. Городок (див. дані табл. 2) була отримана оцінка  $R_S = 4,4 \cdot 10^{-5}$ , чол./рік, яка майже в 2,6 раза перевищує наведене в звіті з ОВД [21] значення  $R_S = 1,7 \cdot 10^{-5}$ , чол./рік, хоча і відповідає визначеному як «умовно прийнятний» рівню соціального ризику.

В зв'язку з тим, що статистична оцінка соціального ризику (див. табл. 3) захворюваності на онкологічні хвороби для с. Городок за даними на 2020 р.,  $\hat{R}_S = 1,1 \cdot 10^{-4}$ , чол./рік, виявилася значно вищою отриманих розрахункових значень соціального ризику ( $1,7 \cdot 10^{-5}$  та  $4,4 \cdot 10^{-5}$ , чол./рік) і «непринятною для населення», і зважаючи на те, що соціальний ризик може зростати зі

збільшенням кількості тих, хто ризикує з однакових причин (див. також статистичні дані, наведені в табл. 3 для с. Колоденка і с. Біла Криниця), нами було проведено імітаційне моделювання соціального ризику. Моделювання здійснювалось за даними табл. 2. При цьому переслідувалась мета врахувати потенційно можливий вплив планованої діяльності на жителів і інших населених пунктів (села Обарів, Ставки, Понебель, Карпилівка, Великий Олексин, мікрорайони м. Рівне), що оточують площадку майбутнього підприємства (рис. 1) (див. також додатковий матеріал до звіту з ОВД [21]).

Результати імітаційного моделювання соціального ризику (згідно з даними табл. 2) наведено на рис. 2. Виділено дві криві соціального ризику: криву за результатами виконаних нами альтернативних розрахунків (зокрема, без врахування зайнятості); криву соціального ризику, яка відповідає даним звіту з ОВД [21] (в тому числі з врахуванням зайнятості для 400 осіб).

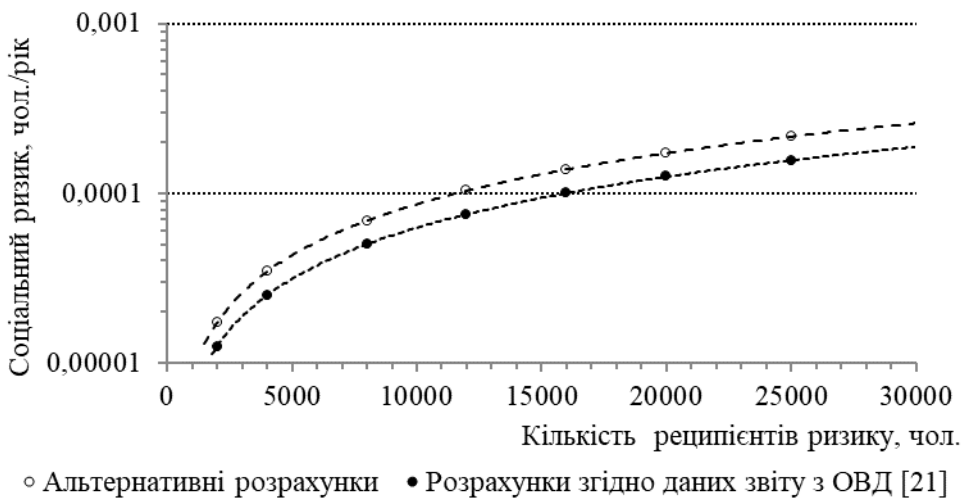


Рисунок 2 – Криві соціального ризику планованої діяльності за результатами імітаційного моделювання

Результати імітаційного моделювання соціального ризику планованої діяльності (рис. 2) показують, що його значення  $10^{-4}$ , чол./рік, «прийнятне для професійних контингентів і неприйнятне для населення», встановлюється при кількості осіб, що ризикують, від 12000 (при розрахунковій масі тіла людини  $M_b = 60$  кг та без врахування зайнятості) до 16000 ( $M_b = 70$  кг та з врахуванням зайнятості при кількості 400 працюючих на підприємстві з місцевих жителів). Зважаючи на особливості територіального розміщення підприємства, в 3-4 км від м. Рівне, практично по центру приміської сільської агломерації (див. рис. 1), складний (пересічений) ландшафт, переважаючі (північно-західні та західні) вітри в сторону м. Рівне, с. Великий Олексин, с. Шпанів, значні викиди забруднень, що декларуються підприємством (див. звіт з ОВД [21]), серед яких лише формальдегіду близько 11 тонн на рік, загальна кількість населення, яке ризикуватиме від планованої діяльності, може перевищити 16-20 тисяч. Чисельність населення лише трьох близько розташованих від підприємства сіл (Городок, Обарів, Великий Олексин)

можна оцінити щонайменше в 12-15 тисяч. По суті, маємо ситуацію, коли від того, наскільки коректно і прозоро буде встановлено чисельність населення, на яке впливатиме діяльність підприємства, залежить не стільки адекватність проведених розрахунків соціального ризику (якщо зважати на умовність, значну спрощеність і неоднозначність прийнятих в [12, 21] моделей), скільки чесність, прозорість і неупередженість його оцінювання.

#### 4. Прикінцеві зауваження

Можна навести багато прикладів маніпулювання даними, результатом якого є применшення значень кількісних оцінок як індивідуального канцерогенного ризику  $CR_a$ , так і власне соціального ризику  $R_s$ . Можна, наприклад, при розрахунках канцерогенного ризику прийняти значення маси тіла людини  $M_b = 60$  кг, як це рекомендується ВООЗ [12], а можна – 70 кг [12, 21], що зменшить канцерогенний ризик. Можна чисельність жителів населеного пункту (наприклад, с. Городок), що ризикують від планованої діяльності, взяти з офіційних даних (5348 осіб), а можна – з Вікіпедії (2719 чоловік) [21], що зменшить соціальний ризик. Можна при оцінюванні соціального ризику врахувати вплив на жителів всіх близько розташованих від місця планованої діяльності населених пунктів (Обарова, Карпилівки, Великого Олексина та ін.), а можна – лише жителів с. Городок, на території якого підприємство розміщується, що знову зменшить соціальний ризик. Питання тоді в тому – навіщо взагалі ці ризики оцінювати? Лише для того, щоб виконати формальні вимоги до звітів з ОВД чи інших подібних процедур?

Якщо ми прагнемо хоча б до прозорості, чесності і неупередженості при оцінюванні ризиків для населення від потенційно небезпечної планованої діяльності в процесах ОВД, то бажано при цьому хоча б виключити різного роду маніпуляції з даними і не захищати таким чином некоректні дані у висновках державних установ про допустимість планованої діяльності, яка потенційно загрожує життю і здоров'ю місцевих жителів.

#### Висновки

В ході представлених досліджень нами було проаналізовано результати кількісного оцінювання соціального ризику планованої діяльності, пов'язаної з підприємством деревообробної промисловості в с. Городок, Рівненської області, які було представлено в звіті з оцінки впливу на довкілля планованої діяльності, визначеної як «Реконструкція промислового комплексу будівель і споруд під підприємство деревообробної промисловості». Встановлено невідповідність отриманих оцінок соціального ризику об'єктивним даним, зокрема про кількість місцевого населення, яке може зазнати негативного впливу. Результати імітаційного моделювання соціального ризику планованої діяльності показали, що його значення, за умови використання об'єктивних даних, можуть перевищити рівні «умовно прийняттого» ризику ( $10^{-4} \div 10^{-6}$ , чол./рік) і сягати рівнів «неприйняттого для населення» соціального ризику ( $10^{-3} \div 10^{-4}$ , чол./рік).

Соціальні ризики, що аналізувалися в цій статті, встановлювалися лише для штатних умов роботи підприємства, без врахування аварійних викидів.



Для більш глибокого вивчення проблеми слід провести окремі дослідження соціального ризику планованої діяльності через можливість виникнення надзвичайних ситуацій внаслідок аварій на підприємстві, що не було зроблено при ОВД і не знайшло відображення в звіті з ОВД, посилаючись на те, що «суворе дотримання технологічних регламентів і інструкцій, правил електробезпеки та протипожежної безпеки виключає можливість створення аварійних ситуацій». Практика показує, що ніякі «регламенти і інструкції» не здатні врахувати всі можливі причини виникнення аварійних ситуацій на потенційно небезпечних виробництвах. Техногенні аварії можуть відбуватися як через помилки персоналу, так і внаслідок непередбачуваної дії природних факторів. Різного роду регулятивні, технологічні та інші заходи здатні лише зменшити ймовірності виникнення аварій, а не унеможливити їх.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Про оцінку впливу на довкілля: Закон України № 2059-VIII від 23.05.2017. Офіційний вісник України. 2017. №50. С. 5. Відомості Верховної Ради (ВВР), 2017, № 29, ст. 315. URL : <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19>.
2. Bernstein P.L. Against the Gods: The Remarkable Story of Risk. Published by J. Wiley & Sons, Inc. N.Y. 1996. 369 p.
3. Kumamoto H., Henley E.J. Probabilistic risk assessment and management for engineers and scientists. N.Y.: IEEE Press, 1996. 597 p.
4. Rowe W. An anatomy of risk. Published by W. J. Wiley & Sons, Inc. N.Y. 1997. 488 p.
5. Векслер А.Б., Ивашинцов Д.А., Стефанишин Д.В. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений. С.-Петербург : ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2002. 591 с.
6. Вітлінський В.В., Верченко П.І. та ін. Економічний ризик: ігрові моделі. Київ: КНЕУ. 2002. 446 с.
7. Качинський А.Б. Безпека, загрози і ризик: наукові концепції та математичні методи: монографія. Ін-т проблем національної безпеки. Нац. акад. служби безпеки України. Київ : [б. н.], 2004. 470 с.
8. Шапкин А.С., Шапкин В.А. Теория риска и моделирование рискованных ситуаций. Москва: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К<sup>0</sup>», 2005. 880 с.
9. Биченок М.М., Иванюта С.П., Яковлев Є.О. Ризики життєдіяльності у природно-техногенному середовищі. Київ : Інститут проблем національної безпеки, 2008. 160 с.
10. Лисиченко Г.В., Забулонов О.Л., Хміль Г.А. Природний, техногенний та екологічний ризики: аналіз, оцінка, управління. Київ : Наукова думка, 2008. 544 с.
11. Taleb N.N. The Black Swan. The Impact of the Highly Improbable. Second enlarged edition. Random House. New York, 2010. 480 p.
12. Методичні рекомендації МР 2.2.12-142-2007. Оцінка ризику для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря. Затверджено наказом МОЗ України від 13.04.07р., № 184. URL : [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=26866](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=26866).
13. Стефанишин Д.В. Актуальність і проблеми аналізу та кількісної оцінки техногенного ризику. Вісник УДУВГП. Вип. 2(26). Рівне : УДУВГП. 2004. С. 37-43.
14. Справочник по страхованию в промышленности. [Пер. с нем. Под ред. Н.А. Никологородского]. Москва : Страховой полис, ЮНИТИ, 1994.
15. Dionne G. Ed. Handbook of Insurance. Kluwer Academic Publishers. 2000. 1119 p.
16. Insurance Handbook. A guide to insurance: what it does and how it works. Insurance Information Institute. New York. 2010. 195 p.
17. Стефанишина-Гаврилюк Ю.Д., Стефанишин Д.В. Прийняття рішень у природокористуванні з урахуванням ризику невикористаних можливостей на підставі

попарного порівняння альтернатив. Системні дослідження та інформаційні технології. 2016. №3. С. 51-62.

18. Стефанишин Д.В. Вибрані задачі оцінки ризику та прийняття рішень за умов стохастичної невизначеності. Київ : Азимут-Україна, 2009. 104 с.

19. Stefanyshyn D.V. On the use of the type I Gumbel distribution to assess risks given floods. Математичне моделювання в економіці. №1, 2018. С. 74-83.

20. Ivashintsov D.A., Stefanishin D.V., Veksler A.B. Ecological and sociodemographic consequences of hydrotechnical construction (Problems of safety and risk). Power Technology and Engineering (formerly Hydrotechnical Construction). 1993. Vol. 27. Num. 12. P. 685-691.

21. Єдиний реєстр з оцінки впливу на довкілля. Товариство з обмеженою відповідальністю «Технопривід Інвест Груп» Рівненська обл., Рівненський р-н, с. Городок, вул. Барона Штейнгеля, 4а (номер реєстраційної справи 20198144297). URL: <http://eia.menr.gov.ua/uk/cases?number=20198144297>.

22. Kronospan UA. URL : [https://kronas.com.ua/ua/brands/kronospan\\_ua](https://kronas.com.ua/ua/brands/kronospan_ua).

23. АБМК project development. URL : <http://www.abmk.com.ua/index.html>.

24. Рівненська обласна державна адміністрація. Департамент екології та природних ресурсів. URL : <https://www.rv.gov.ua/departament-ekologiyi-ta-prirodnih-resursiv>.

## REFERENCES

1. On Environmental Impact Assessment: Law of Ukraine No. 2059-VIII of 23 May 2017 Official Bulletin of Ukraine. (2017). No. 50. P. 5. Verkhovna Rada (BBR) Bulletin, No. 29, Art. 315. Retrieved from <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19>. (in Ukrainian).

2. Bernstein, P.L. (1996). *Against the Gods: The Remarkable Story of Risk*. Published by J. Wiley & Sons, Inc. N.Y., 369 p.

3. Kumamoto, H., Henley, E.J. (1996). *Probabilistic risk assessment and management for engineers and scientists*. N.Y.: IEEE Press, 597 p.

4. Rowe, W. (1997). *An anatomy of risk*. Publ. by W. J. Wiley & Sons, Inc. N.Y. 488 p.

5. Veksler, A.B., Ivashintsov, D.A., Stefanishin, D.V. (2002). *Reliability, social and environmental safety of hydraulic structures: risk assessment and decision making*. St. Petersburg: VNIIG B.E. Vedeneeva, 591 p. (in Russian).

6. Vitlinsky, V.V., Verchenko, P.I etc. (2002). *Economic risk: game models*. Kyiv, KNEU, 446 p. (in Ukrainian).

7. Kaczynsky, A.B. (2004). *Safety, threats and risk: scientific concepts and mathematical methods: monograph*. Institute of national safety problems. Nat. Acad. safety services of Ukraine. Kyiv : [b. n.], 470 p. (in Ukrainian).

8. Shapkin, A.S., Shapkin, V.A. (2005). *Risk theory and modeling of risk situations*. Moscow : Publishing and Trading Corporation "Dashkov and K<sup>0</sup>", 880 p. (in Russian).

9. Bichenok, M.M., Ivanyuta, S.P., Yakovlev, Ye.A. (2008). *Risks of life activity in natural and technogenic environment*. Kyiv : Institute for National Safety Issues, 160 p. (in Ukrainian).

10. Lisichenko, G.V., Zabulonov, Yu.L., Khmil, G.A. (2008). *Natural, man-made and environmental risks: analysis, evaluation, management*. Kyiv : Naukova dumka, 544 p. (in Ukrainian).

11. Taleb, N.N. (2010). *The Black Swan. The Impact of the Highly Improbable*. Second enlarged edition. Random House. New York, 480 p.

12. *Methodological recommendations of MR 2.2.12-142-2007. Risk assessment of public health from atmospheric pollution*. (2007). Approved by the order of the Ministry of Health of Ukraine dated April 13, 2007, No. 184. Retrieved from [http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=26866](http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page.html?id_doc=26866). (in Ukrainian).

13. Stefanyshyn, D.V. (2004). *Relevance and problems of anthropogenic risk analysis and quantification*. Bulletin of the UDUVGP. No. 2 (26). Rivne : UDUVGP, 37-43. (in Ukrainian).

14. Handbook of insurance in the industry. (1994). [Trans. from German by ed. N.A. Nikolgorodsky]. Moscow : Insurance Policy, UNITI. (in Russian).
15. Dionne, G.Ed. (2000). Handbook of Insurance. Kluwer Academic Publishers, 1119 p.
16. Insurance Handbook. A guide to insurance: what it does and how it works. (2010). Insurance Information Institute. New York, 195 p.
17. Stefanyshyna-Gavryliuk, Yu.D., Stefanyshyn, D.V. (2016). Decision-making in natural resources use taking into account the risk of lost opportunities based on pairwise comparison of alternatives. System Research and Information Technologies, No. 3, 51-62. (in Ukrainian).
18. Stefanyshyn, D.V. (2009). Selected tasks of risk assessment and decision making under stochastic uncertainty. Kyiv : Azymut-Ukraine, 104 p.
19. Stefanyshyn, D.V. (2018). On the use of the type I Gumbel distribution to assess risks given floods. Mathematical modeling in economy. No. 1, 74-83.
20. Ivashintsov, D.A., Stefanishin, D.V., Veksler, A.B. (1993). Ecological and sociodemographic consequences of hydrotechnical construction (Problems of safety and risk). Power Technology and Engineering (formerly Hydrotechnical Construction). Vol. 27. Num. 12, 685-691.
21. Unified registry for Environmental Impact Assessment. Technoprivod Invest Group, Limited Liability Company, Rivne region, Rivne district, vill. Gorodok, Baron Steingel str., 4a (registration number 20198144297). Retrieved from <http://eia.menr.gov.ua/uk/cases?number=20198144297>. (in Ukrainian).
22. Kronospan UA. Retrieved from [https://kronas.com.ua/ua/brands/kronospan\\_ua](https://kronas.com.ua/ua/brands/kronospan_ua). (in Ukrainian).
23. ABMK project development. Retrieved from <http://www.abmk.com.ua/index.html>. (in Ukrainian).
24. Rivne Regional State Administration. Department of Ecology and Natural Resources. Retrieved from <https://www.rv.gov.ua/departament-ekologiyi-ta-prirodnih-resursiv>. (in Ukrainian).

*Стаття надійшла до редакції 12.11.2019.*

## ДИСКУСІЙНІ ПОВІДОМЛЕННЯ

УДК 004.942 ; 54 ; 087 ; 078

<https://orcid.org/0000-0001-8030-2866>

**М.М. БЕКЕТОВ**

### **МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВЛАСТИВОСТЕЙ ІНЕРТНИХ ГАЗІВ ТА НОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ПОЧАТКУ ПЕРІОДИЧНОЇ ТАБЛИЦІ**

***Анотація.** На основі даних хімічних елементів виявлено закономірності властивостей інертних газів та здійснено математичне моделювання з метою прогнозування властивостей нових елементів на початку Періодичної таблиці Д.І. Менделєєва у редакції 1905 року та на початку Просторової 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, максимальної кількості електронів за енергетичними рівнями у інертних газів, співвідношення властивостей елементів та особливостей будови їхніх атомів, ядерного синтезу елементів, особливостей іонізації елементів та речовин. Можливими елементами на початку Періодичної таблиці розглядаються фотон і Бозон Хіггса. У математичній моделі аналізувалися особливості взаємодії елементарних частинок елементів та речовин з бозоном Хіггса та фотонами світла. Математичний аналіз підтверджує можливість знаходження нових елементів на початку Періодичної таблиці – як і вважав Д.І. Менделєєв.*

***Ключові слова:** Математична модель, Просторова модель, Періодичний закон хімічних елементів, Періодична таблиця, Менделєєв, частинки, бозон, фотон, просторова енергія, об'ємне бачення.*

**DOI: 10.35350/2409-8876-2020-18-1-102-111**

#### **Вступ**

Генеральна асамблея ООН проголосила 2019 рік «Міжнародним роком Періодичної таблиці хімічних елементів (ІУРТ2019)». Ця подія присвячена 150-річчю відкриття Періодичного закону хімічних елементів великим вченим Д.І. Менделєєвим.

Проведення Міжнародного року координувалося Міжнародною програмою ЮНЕСКО з фундаментальних наук (МПФН) і Міжнародним союзом теоретичної і прикладної хімії (МСПХ) у співпраці з національними, регіональними та міжнародними товариствами і союзами. В рамках проведення заходів на підтримку проголошеного Генеральною асамблеєю ООН Міжнародного року Періодичної таблиці хімічних елементів (ІУРТ2019)» була розроблена [1] Просторова модель Періодичного закону хімічних елементів (далі – Просторова модель). 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. 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.

## **1. Загальна характеристика властивостей нових елементів на початку Періодичної таблиці, які Менделєєв відніс до групи інертних газів**

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].

Д.І. Менделєєв вважав, що для інертних газів необхідно створити окрему групу – «нульову», розмістивши цю групу перед елементами першої групи. Менделєєв, у своїй статті 1905 року, припускав «існування елементів, легших за водень». Для розміщення цих елементів Д.І. Менделєєв створив у Періодичній таблиці «нульовий період» [3].

Нові елементи на початку Періодичної таблиці Менделєєв відніс до групи інертних газів. Відповідно основні характеристики, особливості будови та властивості цих нових елементів повинні відповідати характеристикам, властивостям та особливостям будови інертних газів.

## **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. Математичний аналіз здійснювався учнями середніх шкіл – відповідно, використовувались етапи, методи та засоби математичного моделювання в рамках загальної середньої освіти. В. О. Швець виділяє такі етапи розв'язування прикладної задачі у школі [4]: створення математичної моделі; дослідження математичної моделі та вирішення математичної задачі; інтерпретація отриманих результатів.

Об'єкт дослідження – основні характеристики, особливості будови та властивості елементів у зв'язку із Періодичним законом хімічних елементів. Предмет дослідження – порядкові атомні номери елементів, відносні атомні маси елементів, максимальні кількості електронів за енергетичними рівнями у інертних газів, співвідношення властивостей елементів та особливостей будови їхніх атомів, ядерний синтез елементів, особливості іонізації елементів та речовин, аналіз особливостей взаємодії елементарних частинок елементів та речовин з бозоном Хіггса та фотонами світла.

Мета дослідження – підтвердження можливості знаходження та прогнозування основних характеристик і властивостей нових елементів на початку Періодичної таблиці Д.І. Менделєєва у редакції 1905 року та на початку Просторової моделі Періодичного закону хімічних елементів за [1].

### 3. Методика і результати досліджень

В зв'язку з тим, що можливі елементи на початку Періодичної таблиці віднесені Менделєєвим до групи інертних газів [3], при здійсненні математичного аналізу за базові характеристики приймаються основні закономірності властивостей та особливостей будови інертних газів.

Таблиця 1 – Максимальна густина електронів на оболонках (енергетичних рівнях) елементів, що належать до групи інертних газів

Найменування елементів	Символи елементів	Енергетичні рівні							Загальна кількість електронів
		1	2	3	4	5	6	7	
Гелій	He	2	-	-	-	-	-	-	2
Неон	Ne	2	8	-	-	-	-	-	10
Аргон	Ar	2	8	8	-	-	-	-	18
Криптон	Kr	2	8	18	8	-	-	-	36
Ксенон	Xe	2	8	18	18	8	-	-	54
Радон	Rn	2	8	18	32	18	8	-	86
Оганесон	Og	2	8	18	32	32	18	8	118

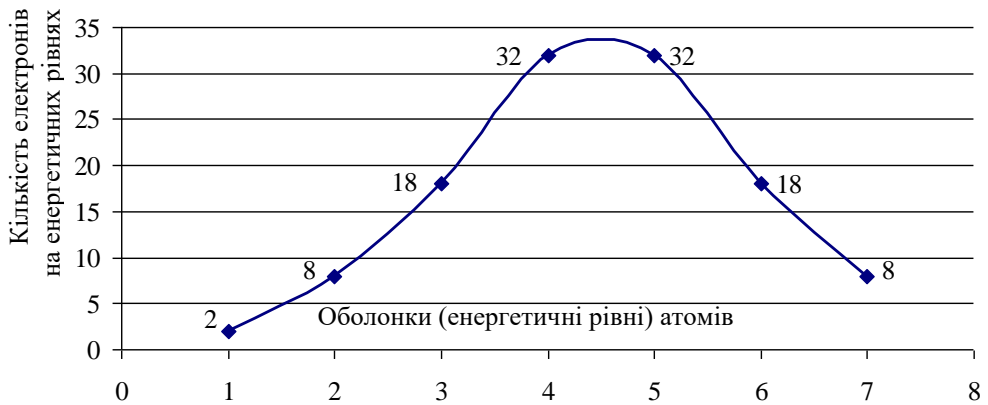


Рисунок 1 – Максимальна густина електронів на оболонках (енергетичних рівнях) елементів, що належать до групи інертних газів

Вищенаведене дає підстави вважати, що нові елементи на початку Періодичної таблиці, які Д.І. Менделєєв відніс до інертних газів – є нейтральними елементарними частинками з нульовим зарядом. Ці елементи – можуть мати масу, меншу за Гідроген (Водень), або не мають маси.

У важких інертних газів (починаючи з криптону) – в міру зростання порядкового номера електрони віддаляються від ядра, зростає можливість окислення інертного газу сильними окислювачами.

Атоми легких інертних газів є нейтральними та інертними – тобто вони за умов рівноваги у атомах не вступають у хімічні реакції з іншими елементами. Але іонізація інертних газів призводить до того, що іони інертних газів вступають у взаємодію з іншими елементами.

Слід зазначити, що протони ядра та електрони – частинки з протилежними зарядами, які притягуються силами кулонівської взаємодії. Відірвати електрон від атому – досить складно, і можливо лише за умов наявності зовнішньої енергії іонізації, яка перевищує енергію зв’язку в атомі.

Із зменшенням порядкового номера інертних газів знизу догори Періодичної таблиці – спостерігається значне збільшення енергії іонізації.

Між інертними газами та наступними за ними елементами першої групи – велика різниця енергії іонізації, що можна побачити з таблиці та рисунку 2.

Таблиця 2 – Енергія іонізації інертних газів та елементів першої групи

Найменування елементів	Символ елемента	Енергія іонізації, еВ
Гідроген (Водень)	H	13,60
<b>Гелій</b>	<b>He</b>	<b>24,47</b>
Літій	Li	5,39
<b>Неон</b>	<b>Ne</b>	<b>21,55</b>
Натрій	Na	5,14
<b>Аргон</b>	<b>Ar</b>	<b>15,76</b>
Калій	K	4,34
<b>Криптон</b>	<b>Kr</b>	<b>14,00</b>
Рубідій	Rb	4,17
<b>Ксенон</b>	<b>Xe</b>	<b>12,13</b>
Цезій	Cs	3,89
<b>Радон</b>	<b>Rn</b>	<b>10,74</b>
Францій	Fr	4,07
<b>Оганесон</b>	<b>Og</b>	<b>10,10</b>

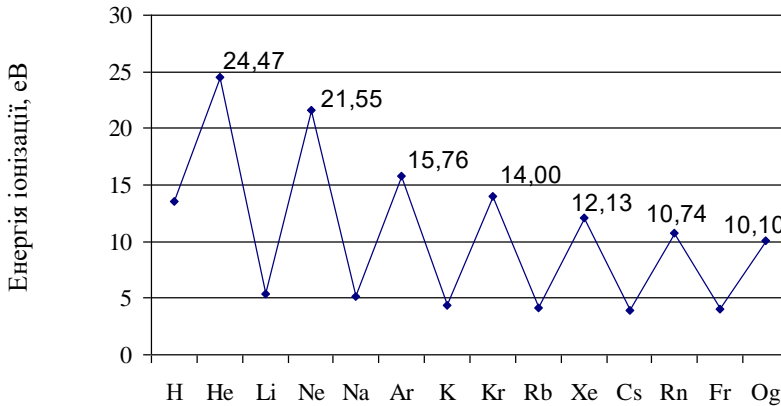


Рисунок 2 – Енергія іонізації інертних газів та елементів першої групи

Вищенаведене свідчить, що основні властивості нових елементів на початку Періодичної таблиці – відповідають значному збільшенню енергії іонізації інертних газів знизу догори Періодичної таблиці.

Результати математичного аналізу дають підстави вважати, що у нових елементів на початку Періодичної таблиці – може спостерігатися значне

збільшення енергії та/або можливість збільшувати чи зменшувати енергію елементу в залежності від основних характеристик.

Властивості інертних газів дають підстави вважати, що нові елементи на початку Періодичної таблиці – це інертні елементарні частинки, що не вступають у хімічні реакції з іншими елементами, але можуть взаємодіяти з ними за умов виходу з врівноваженого стану.

Аналіз основних закономірностей властивостей та особливостей будови інертних газів дає можливість прогнозування властивостей нових елементів на початку Періодичної таблиці.

#### 4. Прогнозування особливостей та властивостей нових елементів

Результати математичного аналізу [5] свідчать, що нові елементи на початку Періодичної таблиці:

- є нейтральними елементарними частинками з нульовим зарядом;
- не вступають у хімічні реакції з іншими елементами, але можуть взаємодіяти з ними за умов виходу з врівноваженого стану;
- властивості цих елементів [6] відповідають значному збільшенню енергії та/або можливості збільшувати чи зменшувати енергію елементу в залежності від основних характеристик.

Атом Гідрогену (Водню) складається лише з протона і електрона та має масу 1,00784 а.о.м. Нейтрон (n) має нульовий заряд та масу 1,00866 а.о.м. [7], що більше маси Гідрогену. Ядро Гелію складається з 2 протонів та 2 нейтронів та має дефект мас (як і всі наступні елементи) – сумарна маса ядра Гелію менша за окремі маси протонів та нейтронів, що його складають.

У надрах Сонця здійснюється перетворення атомів Гідрогену (Водню) на атом Гелію у Протон-протонному циклі.

Таблиця 3 – Протон-протонний цикл

Вхідні речовини			Продукти реакції		
Найменування	Символ	Відносна атомна маса, а.о.м.	Найменування	Символ	Відносна атомна маса, а.о.м.
Гідроген (Водень)	H	1,00784	Гелій	He	4,00260
Гідроген (Водень)	H	1,00784			
Гідроген (Водень)	H	1,00784			
Гідроген (Водень)	H	1,00784			
РАЗОМ		4,03136	РАЗОМ		4,00260
Втрата маси в процесі реакції			x	x	0,02876
Втрата маси у відсотках			x	x	0,7

Кінцевим продуктом протон-протонного циклу (ppI), що домінує при температурах від 10 до 14 мільйонів градусів, є ядро атома Гелію, що виникло в результаті злиття чотирьох протонів з виділенням енергії, еквівалентної 0,7% маси цих протонів [8]. Ці реакції ядерного синтезу породжують електромагнітні хвилі, які, долаючи приблизно 150 мільйонів кілометрів, приносять на Землю світло та тепло. Маса стає енергією електромагнітних хвиль за формулою Ейнштейна:



$$E_0 = m \times c^2, \quad (1)$$

де  $E_0$  – енергія спокою, Дж;

$m$  – маса, кг;

$c^2$  – квадрат швидкості світла в вакуумі,  $c^2 \approx 9 \times 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2$ .

Ця енергія електромагнітних хвиль поширюється у вакуумі космосу.

Ще на початку 20 століття серійно випускалися детекторні приймачі, що працювали без додаткових джерел енергії – лише використовуючи енергію електромагнітних радіохвиль. Розвиваючи цю ідею, вчені створили пристрій для зарядки мобільних пристроїв енергією електромагнітних радіохвиль – гнучку плівку товщиною лише 3 атоми [9].

Енергія електромагнітних хвиль може рухатись у просторі (в тому числі у вакуумі космосу), незалежно від наявності чи відсутності матерії, тому для неї необхідно ввести новий термін – «просторова енергія». Носіями цієї просторової енергії є елементарні частинки – фотони.

Фотони є найпоширенішими за кількістю частинками у Всесвіті [10]. Фотони є квантами-носіями електромагнітного поля [11]. Вони проникають навіть у атоми будь-яких елементів та речовин. У фізичному вакуумі атому – в залежності від отримання чи випромінювання енергії фотона, електрон може змінювати орбіталь. При цьому поглинається або випускається квант енергії [12]. Фотон – нейтральна інертна частинка, з нульовим зарядом [11]. Фотон вважається безмасовою частинкою, з масою не більше  $10^{-22}$  еВ [13] – тому рухається із швидкістю світла [14]. Енергію квантів електромагнітного випромінювання (фотонів) виражають в електронвольтах еВ [15].

Енергія фотонів може приймати значення у широкому діапазоні в залежності від довжини електромагнітної хвилі та розраховується за формулою [16]:

$$E_{\text{ев}} = h \times c / \lambda, \quad (2)$$

де  $E_{\text{ев}}$  – енергія електромагнітного випромінювання фотонів, еВ;

$h$  – стала Планка,  $h \approx 4,136 \times 10^{-15} \text{ еВ}\cdot\text{с}$ ;

$c$  – швидкість світла в вакуумі,  $c \approx 3 \times 10^8 \text{ м/с}$ ;

$\lambda$  – довжина електромагнітної хвилі, м.

Добуток сталої Планка на швидкість світла дорівнює  $h \times c \approx 1,24 \times 10^{-6} \text{ еВ}\cdot\text{м}$ , наприклад, фотон з довжиною хвилі 1 нм ( $1 \times 10^{-9} \text{ м}$ ) має енергію 1240 еВ; фотон з енергією 10 еВ має довжину хвилі 124 нм. Чим менше довжина хвилі електромагнітного випромінювання, тим більшу енергію має фотон.

Фотон не вступає у хімічні реакції, але взаємодіє з елементами (електронами в атомах) та речовинами – наприклад, може іонізувати прості та складні гази за умов співвідношення енергії фотона (що залежить від довжини електромагнітної хвилі) та енергії іонізації газу.

Набуття маси елементарними частинками пов'язано із полем Хіггса. Це скалярне поле, що пронизує весь простір та матерію Всесвіту [17]. Маса всіх тіл зумовлена масами їх складових частин і, в кінцевому підсумку, масами фундаментальних цеглин матерії – кварків і лептонів [18]. Складові атомів всіх відомих хімічних елементів: протони та нейтрони ядер атомів – складаються з кварків, а електрони – є лептонами. Ці елементарні частинки набувають маси завдяки взаємодії зі скалярним полем – полем Хіггса.

Внаслідок спонтанного порушення електрослабкої симетрії виникає квант поля Хіггса – бозон Хіггса [18]. Бозон Хіггса – це нейтральна інертна частинка, з нульовим зарядом. Бозони Хіггса не вступають в реакції, але взаємодіють зі всіма елементарними частинками, що мають масу. Енергія Бозону Хіггса складає  $125 \times 10^9$  eV [19]. Такий значний обсяг енергії може бути складовою енергії «переходу» – «матеріалізації» елементарних частинок, що набувають масу. Бозон Хіггса може розпадатися на два фотони [18]. Фотони, як безмасові частинки, вільно проходять крізь поле Хіггса.

Протон та електрон – елементарні частинки, що мають масу, відповідний заряд  $p^+$  та  $e^-$  та напівцілий спіні ( $+1/2$  чи  $-1/2$ ), разом вони складають нейтральний атом Гідрогену (Водню).

Бозон Хіггса – елементарна частинка, квант поля Хіггса, має нульовий заряд та нульовий спіні (що дорівнює 0). Фотон – елементарна частинка, квант електромагнітного поля, вважається безмасовим, має нульовий заряд та цілий спіні ( $+1$  чи  $-1$ ).

Можливими елементами на початку Періодичної таблиці можуть розглядатися фотон і Бозон Хіггса – що є інертними та нейтральними елементарними частинками, які мають нульовий заряд.

## **5. Місцезнаходження нових елементів у Періодичній таблиці та Просторовій моделі Періодичного закону хімічних елементів**

Д.І. Менделєєв помістив два невідомі на той час елементи у нульову групу інертних газів та попереду Гідрогену (Водню) – на початку нульового та першого періоду. Але, напевно, розміщення елементів повинно максимально повно відображати їх сутність. Тому для визначення місцезнаходження нових елементів використовується Просторова модель Періодичного закону хімічних елементів [1]. У Просторовій моделі всі відомі елементи об'єднані у нерозривний ланцюг за зростанням їхніх порядкових номерів, та цей ланцюг скручено у спіраль та спорідненням їхніх властивостей. Спіраль розміщено на трьох опорах-стовпах, що виконані у формі циліндрів з прозорої плівки.

Поле Хіггса – це всеосяжне та всепроникливе поле, що пронизує весь простір та всю матерію Всесвіту. Бозони Хіггса ( $H^0$ ) – елементарні частинки, що є квантами цього поля. Бозони Хіггса забезпечують «перехід» складових матерії з всепроникливого електромагнітного до матеріального стану. Тому Бозон Хіггса символізує прозора плівка опор-стовпів Просторової моделі, з якою контактують всі та кожен елемент Просторової моделі.

Фотони ( $\gamma$ ,  $\gamma^0$ ) – це всюдисущі та всепроникливі частинки, які рухаються у просторі, проникаючи крізь матерію (навіть крізь атоми, взаємодіючи з електронами). Тому фотони містяться у всьому просторі навкруги, всередині опор-стовпів та всередині кожного з атомів елементів Просторової моделі. Фотони – є найпершим та всюдисущим елементом Просторової моделі.

## **Висновки**

Д.І. Менделєєв все життя шукав «начало всіх начал». Для цього він систематизував елементи та створив Періодичну таблицю. Інформацію про начало всіх начал та основи давніх наукових знань (у вигляді знайомих

кожному простих образів, пов'язаних єдиною сюжетною лінією) містять і стародавні письмові релігійні джерела, написані до церковних реформ.

В началі – була електромагнітна взаємодія, і цю взаємодію забезпечують фотони.

В результаті проведених досліджень з'ясувалися основні характеристики і властивості нових елементів на початку Періодичної таблиці Д.І. Менделєєва у редакції 1905 року та на початку Просторової моделі Періодичного закону хімічних елементів, про що було зазначено в попередній роботі [1] – це нейтральні інертні елементи, що не вступають у хімічні реакції з іншими елементами, але можуть взаємодіяти з ними за умов виходу з врівноваженого стану, властивості цих елементів відповідають значному збільшенню енергії та/або можливості збільшувати чи зменшувати енергію елементу в залежності від основних характеристик. Можливими елементами на початку Періодичної таблиці можуть розглядатися фотон і Бозон Хіггса, що є інертними та нейтральними елементарними частинками, мають нульовий заряд. Бозон Хіггса може бути «перехідним» елементом, при взаємодії з яким елементарні частинки набувають маси. Бозон Хіггса може розпадатися на два фотони. Фотони вільно проходять крізь поле Хіггса, яке пронизує весь простір та матерію Всесвіту. Фотон – є носієм енергії електромагнітних хвиль та може рухатись у вакуумі космосу (та у фізичному вакуумі атомів). Фотон при достатній енергії (що відповідає довжині електромагнітної хвилі) – взаємодіє з газами повітря, іонізуючи їх та утворюючи іони та електрони. Іонізація газів робить повітря електропровідним. Результати досліджень можуть застосовуватись в освітній, науковій та дослідницькій діяльності. Математична та Просторова модель підтверджують можливість знаходження нових елементів на початку Періодичної таблиці – як і вважав Д.І. Менделєєв. У Просторовій моделі Періодичного закону хімічних елементів [1] Бозон Хіггса символізує прозора плівка опор-стовпів Просторової моделі, з якою контактують всі та кожен елемент Просторової моделі; фотони – містяться у всьому просторі навкруги та всередині кожного з атомів елементів Просторової моделі, тому фотони – є найпершим та всюдисущим елементом Просторової моделі.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бекетов М.М. Математична та Просторова модель Періодичного закону хімічних елементів // Математичне моделювання в економіці. – 2019. – № 4. – С. 118–124.
2. Менделєєв Д. И. Основы химии. Том 2. — М.: Госхимиздат, 1947. – 389 с.
3. Менделєєв Д.И. Попытка химического понимания мирового эфира. СПб., 1905.
4. 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.
5. 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.
6. 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.

7. Д.И. Менделеев «Периодический закон». Редакция, статья и примечания Б.М. Кедрова. Издательство Академии Наук СССР, Москва, 1958. С. 470-517.
8. Л.И. Сарычева. Введение в физику микромира — физика частиц и ядер, ISBN 978-5-397-02675-8
9. Питание электроники от сигнала Wi-Fi. Разработана уникальная 2D-ректенна с диодом Шоттки из MoS2 толщиной всего три атома. Блог компании GlobalSign URL: <https://habr.com/ru/company/globalsign/blog/438080/>
10. Вайнберг С. Первые три минуты / Стивен Вайнберг; [пер. с англ. В. Строкова] — М.: Эксмо, 2011. — 208 с. — ISBN 978-5-699-46169-1 п. Реликтовое излучение, С. 84.
11. Комар А.А., Лебедев А.И. Электромагнитное взаимодействие // Физическая энциклопедия : [в 5 т.] / Гл. ред. А.М. Прохоров. — М.: Большая российская энциклопедия, 1999. — Т. 5: Стробоскопические приборы — Яркость. — С. 540—542. — 692 с. — 20 000 экз. — ISBN 5-85270-101-7.
12. Ахметов Н.С. Общая неорганическая химия: Учебник для вузов. — М.: Высш. Школа, 1981. — 679 с., ил. — С. 19.
13. Pani Paolo, Cardoso Vitor, Gualtieri Leonardo, Berti Emanuele, Ishibashi Akihiro. Black-Hole Bombs and Photon-Mass Bounds // Physical Review Letters. — 2012. — Vol. 109, iss. 13. — P. 131102 (5 p.). — DOI:10.1103/PhysRevLett.109.131102.
14. Широков Ю. М., Юдин Н. П. Ядерная физика. — М.: Наука, 1972. — 670 с. — С. 240.
15. Электронвольт // Большая советская энциклопедия : [в 30 т.] / гл. ред. А.М. Прохоров. — 3-е изд. — М. : Советская энциклопедия, 1969—1978.
16. Савельев И.В. — М.: 1967. — Т. III. Оптика, атомная физика, элементарные частицы. — 416 с.
17. Yorikiyo Nagashima, Elementary Particle Physics: Quantum Field Theory and Particles, v1. — Wiley-VHC, 2013. — 646 p.
18. Бозон Гіггса: передбачення, пошук, відкриття / Е.В. Горбар, В.П. Гусинін // Вісн. НАН України. — 2014. — № 3. — С. 31-41. — Бібліогр.: 19 назв. — укр.
19. LHC experiments join forces to zoom in on the Higgs boson. CERN. 17 March 2015.

## REFERENCES

1. Beketov M.M. Mathematical and Spatial Model of the Periodic Table of Chemical Elements // Mathematical modeling in economy. — 2019. — № 1. — P. 118–124.
2. Mendeleev D.I. Fundamentals of chemistry. Volume 2. — М. : Goskhimizdat, 1947. — 389 p.
3. D.I. Mendeleev, An attempt at chemical understanding of the world ether. St. Petersburg, 1905.
4. Shvets, V.O. Matematychno modeliuвання yak zmistova liniia shkilnoho kursu matematyky / V.O. Shvets // Dydaktyka matematyky : problemy i doslidzhennia: mizhnarodnyi zbirnyk naukovykh robit. — Donetsk : Vyd-vo DonNU, 2009. — № 32. — s. 16-23.
5. Kyryliuk, L.L. Vykorystannia matematychnoho modeliuвання pry rozviazuvanni zadach u kursi alhebrы osnovnoi shkoly / L.L. Kyryliuk // Veresen. — 2009. — № 3-4 (48-49). — s. 72-78.
6. Panchenko, L.V. Systema prykladnykh zadach yak zasib formuvannia vmin matematychnoho modeliuвання u maibutnykh vchyteliv matematyky / L.V. Panchenko // Matematyka v shkoli. — 2004. — № 9-10. — s. 21-28.
7. D.I. Mendeleev «Periodicheskiy zakon». Redaktsiya. statia i primechaniya B.M. Kedrova. Izdatelstvo Akademii Nauk SSSR. Moskva. 1958. s. 470-517.
8. L.I. Sarycheva. Vvedeniye v fiziku mikromira — fizika chastits i yader. ISBN 978-5-397-02675-8
9. Pitaniye elektroniki ot signala Wi-Fi. Razrabotana unikalnaya 2D-rektenna s diodom Shottki iz MoS2 tolshchinoy vsego tri atoma. Blog kompanii GlobalSign URL: <https://habr.com/ru/company/globalsign/blog/438080/>

10. Vaynberg S. Pervyye tri minuty / Stiven Vaynberg; [per. s angl. V. Strokova] — M.: Eksmo. 2011. — 208 s. — ISBN 978-5-699-46169-1 p. Reliktovoye izlucheniye. s. 84.
11. Komar A.A., Lebedev A.I. Elektromagnitnoye vzaimodeystviye // Fizicheskaya entsiklopediya : [v 5 t.] / Gl. red. A.M. Prokhorov. — M.: Bolshaya rossiyskaya entsiklopediya. 1999. — T. 5: Stroboskopicheskiye pribory — Yarkost. — S. 540—542. — 692 s. — 20 000 ekz. — ISBN 5-85270-101-7.
12. Akhmetov N.S. Obshchaya neorganicheskaya khimiya: Uchebnik dlya vuzov. — M.: Vyssh. Shkola. 1981. — 679 s. il. — s. 19.
13. Pani Paolo, Cardoso Vitor, Gualtieri Leonardo, Berti Emanuele, Ishibashi Akihiro. Black-Hole Bombs and Photon-Mass Bounds // Physical Review Letters. — 2012. — Vol. 109, iss. 13. — P. 131102 (5 p.). — DOI:10.1103/PhysRevLett.109.131102.
14. Shirokov Yu.M., Yudin N.P. Yadernaya fizika. — M.: Nauka. 1972. — 670 s. — s. 240.
15. Elektronvolt // Bolshaya sovetskaya entsiklopediya : [v 30 t.] / gl. red. A.M. Prokhorov. — 3-e izd. — M. : Sovetskaya entsiklopediya. 1969—1978.
16. Savelyev I.V. — M.: 1967. — T. III. Optika. atomnaya fizika. elementarnyye chastitsy. — 416 s.
17. Yorikiyo Nagashima, Elementary Particle Physics: Quantum Field Theory and Particles, v1. — Wiley-VHC, 2013. — 646 p.
18. Bozon Hihhsa: peredbachennia, poshuk, vidkryttia / E.V. Horbar, V.P. Husynin // Visn. NAN Ukrainy. — 2014. — № 3. — S. 31-41. — Bibliohr.: 19 nazv. — ukr.
19. LHC experiments join forces to zoom in on the Higgs boson. CERN. 17 March 2015.

*Стаття надійшла до редакції 08.12.2019.*

## РЕФЕРАТИ / ABSTRACTS

### ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЕКОНОМІЦІ INFORMATION TECHNOLOGY IN ECONOMY

---

УДК 621.37-39

**Щодо ефективних стратегій національного та регіонального збалансованого розвитку** / Горбулін В.П., Полумієнко С.К., Трофимчук О.М. // Математичне моделювання в економіці. – 2020. – № 1. – С. 5–18.

В статті розглядається побудова систем індикаторів та індексів сталого та збалансованого розвитку та теоретико-ігрового моделювання відповідних стратегій. Робиться висновок щодо складності їх знаходження. Пропонується ресурсний підхід до визначення індикаторів по різних сферах життєдіяльності суспільства, включаючи їх кількісні та якісні оцінки, а також уніфікований індекс для оцінки стану цих сфер та відповідних стратегій розвитку. На цій основі будується індекс збалансованого регіонального та національного розвитку.

UDC 621.37-39

**On effective national and regional balanced development strategies** / V.P. Horbulin, S.K. Polumiienko, O.M. Trofymchuk // Mathematical modeling in economy. – 2020. – № 1. – P. 5–18.

The article deals with the construction of indicator systems and indices of sustainable and balanced development and game-theoretical modeling of corresponding strategies. The difficulty of finding them is concluded. A resource-based approach to defining indicators of different society activities including quantitative and qualitative evaluations is proposed, as well as a unified index for estimating the status of their areas and related development strategies. On this basis, an index of balanced regional and national development is built.

УДК 681.5.01: 629.52.7.

**Удосконалення системи екологічного моніторингу сміттєзвалищ із застосуванням дистанційно пілотованих літальних апаратів** / Триснюк В.М., Сметанін К.В., Триснюк Т.В., Курило А.В. // Математичне моделювання в економіці. – 2020. – № 1. – С. 19–26.

В роботі запропонована аналітична модель оцінювання якості виконання завдань екологічного моніторингу сміттєзвалищ засобами ДПЛА, особливістю якої є урахування характеру антропогенного впливу на стан довкілля за допомогою удосконалення апаратури екологічного спостереження шляхом оптимізації структури та параметрів бортового обладнання літального апарату. Розроблено алгоритм керування ДПЛА екологічного спостереження, який, на відміну від існуючих, забезпечує стабілізацію об'єкта на досліджуваній траєкторії і підвищення точності оцінювання екологічної безпеки об'єктів спостереження за допомогою використання каналу зв'язку з ДПЛА. Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що на основі вдосконаленого науково-методичного апарату використання ДПЛА в системі екологічного моніторингу сміттєзвалищ можна побудувати екологічні карти техногенного характеру. Це дозволить підвищити

достовірність отриманих даних, визначити характер і властивості антропогенних зон впливу.

UDC 681.5.01: 629.52.7.

**Improvement of the system of ecological monitoring of garbage dumps using remote piloted aircraft** / Trysnyuk V.M., Smetanin K.V., Trysnyuk T.V., Kurilo A.V. // *Mathematical modeling in economics*. – 2020. – № 1. – P. 19–26.

The analytical model of estimation of quality of performance of tasks of ecological monitoring of landfills by means of UAVs, which feature is taking into account the nature of anthropogenic influence on the state of the environment by improving the equipment of environmental observation by optimizing the structure and parameters of onboard equipment of the aircraft. A control algorithm for environmental surveillance UAVs has been developed, which, unlike the existing ones, provides stabilization of the object on the research trajectory and provides improved accuracy of the environmental safety assessment of the observation objects through the use of the UAV communication channel. The practical significance of the obtained results is that on the basis of the improved scientific and methodological apparatus of using the UAV in the system of ecological monitoring of landfills it is possible to construct ecological maps of anthropogenic character. This will increase the reliability of the data obtained, determine the nature and properties of anthropogenic zones of influence.

---

## МАТЕМАТИЧНІ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ МОДЕЛІ В ЕКОНОМІЦІ MATHEMATICAL AND INFORMATIONAL MODELS IN ECONOMY

---

УДК 615.47:621

**Програмний комплекс для автоматизованого аналізу серцевого ритму на основі векторного ритмокардіосигналу** / Литвиненко Я.В., Лупенко С.А., Ониськів П.А., Триснюк В.М., Зозуля А.М. // *Математичне моделювання в економіці*. – 2020. – № 1. – С. 27–38.

У роботі розглядається модернізований програмний комплекс для аналізу серцевого ритму з підвищеною інформативністю. Збільшення інформативності досягається за рахунок використання нової математичної моделі сигналів серця, у вигляді умовного циклічного випадкового процесу та нових методів його опрацювання. Загалом, програмний комплекс дає змогу проводити автоматизований аналіз електрокардіосигналу, зокрема морфологічний аналіз та аналіз серцевого ритму на основі сформованого векторного ритмокардіосигналу (ритмокардіограми) з підвищеною інформативністю. Розроблений комплекс програм дає змогу проводити автоматизований аналіз серцевого ритму на основі опрацювання електрокардіосигналу та аналізу сформованого векторного ритмокардіосигналу (ритмокардіограми) з підвищеною інформативністю. Створений комплекс програм може бути використаний в якості складової частини спеціалізованого програмного забезпечення в автоматизованих діагностичних системах для комплексного морфоаналізу та аналізу серцевого ритму.

UDC 615.47: 621

**Software for automated analysis of heart rhythm based on vector rhythmocardiogram** / Litvinenko Y.V., Lupenko S.A., Onis'kiv P.A., Trisnyuk V.M., Zozulya A.M. // *Mathematical modeling in economics*. – 2020. – № 1. – P. 27–38.

In the work the modernized program complex for the analysis of the heart rhythm with the raised information is considered. Increasing the information content is achieved through the use of a new mathematical model of heart signals, in the form of conditional cyclic random

process and new methods of its processing. In general, the software complex allows for the automated analysis of electrocardiogram, including morphological analysis and heart rate analysis based on the generated vector rhythmocardiogram (rhythmocardiogram) with increased informative content. ) with increased content. The created program complex can be used as a component of specialized software in automated diagnostic systems for complex morphoanalysis and heart rate analysis.

---

УДК 004.942; 519.6

**Визначення коефіцієнта щільності прилягання при математичному моделюванні робочого зачеплення просторових передач / Лифар В.О., Ратов Д.В. // Математичне моделювання в економіці. – 2020. – № 1. – С. 39–49.**

У статті представлено продовження досліджень, розглянуто моделювання трансмісійних механізмів з визначенням математичної моделі одного з найважливіших критеріїв працездатності передач – коефіцієнта щільності прилягання активних поверхонь зубів просторових передач, який характеризує напружений стан зубів у об'єктно-імітаційній моделі проектованої передачі.

UDC 004.942; 519.6

**Determination of density fit in the mathematical modeling of spatial working meshing gears / Lyfar V.O., Rатов D.V. // Mathematical modeling in economy. – 2020. – № 1. – P. 39–49.**

The paper presents the continuation of studies, simulation transmission mechanisms discussed the definition of a mathematical model of one of the most important criteria for performance gear – coefficient close fitting surfaces active gear tooth space that characterizes the stress state of teeth in object-simulation model designed transmission.

---

УДК 004.032.3

**Релевантність інформації у часі при здійсненні пошукового запиту / Кряжич О.О., Коваленко О.В. // Математичне моделювання в економіці. – 2020. – № 1. – С. 50–59.**

В роботі наведений огляд питання забезпечення релевантності інформації в часі при здійсненні пошукового запиту. Проаналізований процес сприйняття інформації людиною у вигляді певних полів, що представляється за допомогою математичних функцій. Визначено, що функцією моделі живучої системи буде – точно визначати набір компонентів необхідних для виконання закладених у систему функцій у конкретному часовому інтервалі. Для живучої інформаційної системи перехід між моментами «успіх/невдача» буде залежати від програмних, апаратних і інформаційних засобів. Зроблені висновки щодо практичного застосування.

UDC 004.032.3

**Relevance of information in time when performing a search query / Kryazhych O.O., Kovalenko O.V. // Mathematical modeling in economy. – 2020. – № 1. – P. 50–59.**

This paper provides an overview of the issues of ensuring the relevance of information in time when performing a search query. The process of human perception of information in the form of certain fields is analyzed, which is represented by mathematical functions. It is determined that the function of the living system model will be to determine exactly what set of components is needed to perform the functions embedded in the system in a specific time interval. For a living information system, the transition between "success/failure" moments will depend on software, hardware, and information tools. Conclusions about practical application are made.

---



УДК 004.94; 519.168

**Моделювання розподілу вантажопотоків на автотранспортній мережі міжнародних перевезень** / Васянін В.О., Заяць Ю.В., Ушакова Л.П. // Математичне моделювання в економіці. – 2020. – № 1. – С. 60–73.

У статті наводиться приклад математичного моделювання задач оптимізації ієрархічної структури і розподілу потоків вантажів у реальній автотранспортній мережі міжнародних перевезень. Наведено математичні формулювання основних задач оптимізації. Показано, що в результаті розв'язання оптимізаційних задач вдалося знизити витрати на обробку і транспортування заданих потоків вантажів на 21%. Важливою особливістю розроблених комп'ютерних програм є їх універсальність, що дозволяє проводити моделювання та оптимізацію функціонування не тільки традиційних логістичних систем, а й виробничих транспортно-складських систем, що включають вузли постачальників сировини, виробництва товарів, склади і кінцевих споживачів.

UDC 004.94; 519.168

**Modeling distribution of cargo flows in the international road transport network** / Vasyanin V.A., Zaiats Y.V., Ushakova L.P. // Mathematical modeling in economy. – 2020. – № 1. – P. 60–73.

The article provides an example of mathematical modeling of optimization problems for the hierarchical structure and distribution of cargo flows in a real road transport international network. Mathematical formulations of the main optimization problems are given. It is shown that as a result of solving optimization problems, it was possible to reduce the cost of processing and transportation of given cargo flows by 21%. An important feature developed computer programs is their versatility, which allows modeling and optimizing the functioning of not only traditional logistics systems, but also production transport-storage systems, which are including nodes of suppliers of raw materials, production of goods, a warehouses and end consumers.

---

## АНАЛІЗ, ОЦІНКА ТА ПРОГНОЗУВАННЯ В ЕКОНОМІЦІ ANALYSIS, EVALUATION AND FORECASTING IN ECONOMY

---

УДК 338.432 : 330.342

**Усовершенствование методики комплексной оценки устойчивого развития регионов Украины** / Азаров С.И., Сидоренко В.Л., Задунай А.С. // Математичне моделювання в економіці. – 2020. – № 1. – С. 74–84.

У статті розглянуто методичні підходи до комплексної оцінки рівня розвитку регіонів. Проведено аналіз поточного стану і сталого розвитку регіонів України за сформованою системою показників упродовж 2013–2017 років.

UDC 338.432 : 330.342

**Improving the methodology of a comprehensive assessment of sustainable development of the regions of Ukraine** / Azarov S.I., Sydorenko V.L., Zadunaj O.S. // Mathematical modeling in economy. – 2020. – № 1. – P. 74–84.

The article discusses methodological approaches to a comprehensive assessment of the level of development of regions. The analysis of the current state and sustainable development of the regions of Ukraine according to the current system of indicators during 2013–2017.

УДК 004.413.4 ; 504.05 ; 614.8

**Про моделювання та кількісне оцінювання соціального ризику планованої діяльності, пов'язаної з підприємством деревообробної промисловості в с. Городок, Рівненської області / Стефанишин Д.В. // Математичне моделювання в економіці. – 2020. – № 1. – С. 85–99.**

В статті проаналізовано результати кількісного оцінювання соціального ризику планованої діяльності, пов'язаної з підприємством деревообробної промисловості в с. Городок, Рівненської області, які було представлено в звіті з оцінки впливу на довкілля планованої діяльності, визначеної як «Реконструкція промислового комплексу будівель і споруд під підприємство деревообробної промисловості». Звіт було розроблено Товариством з обмеженою відповідальністю «Технопривід Інвест Груп», як суб'єктом господарювання, яке представляло на момент процедури оцінки впливу на довкілля інтереси відомої міжнародної корпорації «Кроноспан». Поданий звіт з оцінки впливу на довкілля пройшов встановлену Законом України «Про оцінку впливу на довкілля» процедуру, за результатами якої територіальним органом в особі департаменту екології та природних ресурсів Рівненської обласної державної адміністрації було надано висновок про допустимість планованої діяльності. В результаті проведеного аналізу наведеної в звіті кількісної оцінки соціального ризику, отриманої згідно з прийнятою моделлю, встановлено невідповідність цієї оцінки об'єктивним даним, зокрема про стан соціуму, який може зазнати негативного впливу.

UDC 004.413.4 ; 504.05 ; 614.8

**On modeling and quantitative assessment of social risk of planned activity related to the woodworking enterprise in the Gorodok village, Rivne region / Stefanyshyn D.V. // Mathematical modeling in economy. – 2020. – № 1. – P. 85–99.**

The article analyzes the results of quantitative assessment of the social risk of the planned activities related to the woodworking enterprise in the Gorodok village, Rivne region, which were presented in the report on the environmental impact of the planned activity, identified as “Reconstruction of industrial complex of buildings and structures for the enterprise of woodworking industry”. The report was developed by “Technoprivid Invest Group” Limited Liability Company, the entity that represented the well-known international corporation Kronospan at the time of the environmental impact assessment procedure. The submitted Environmental Impact Assessment Report passed the procedure established by the Law of Ukraine “On Environmental Impact Assessment”, which resulted in the conclusion on the admissibility of the planned activity by a territorial authority body represented by the Department of Ecology and Natural Resources of Rivne Regional State Administration. The analysis of the quantitative assessment of social risk examined in accordance with the adopted model revealed the discrepancy of this assessment with objective data, in particular, concerning the community adversely affected by the activity.

---

## ДИСКУСІЙНІ ПОВІДОМЛЕННЯ DISCUSSION'S

---

УДК 004.942 ; 54 ; 087 ; 078

**Математична модель властивостей інертних газів та нових елементів на початку Періодичної таблиці / Бекетов М.М. // Математичне моделювання в економіці. – 2020. – № 1. – С. 100–109.**

На основі даних хімічних елементів виявлено закономірності властивостей інертних газів та здійснено математичне моделювання з метою прогнозування властивостей нових елементів на початку Періодичної таблиці Д.І. Менделєєва у редакції

1905 року та на початку Просторової моделі Періодичного закону хімічних елементів, про що йшлося у попередній роботі. Дослідження ґрунтувалося на аналізі порядкових атомних номерів елементів, відносних атомних мас елементів, максимальної кількості електронів за енергетичними рівнями у інертних газів, співвідношення властивостей елементів та особливостей будови їхніх атомів, ядерного синтезу елементів, особливостей іонізації елементів та речовин, аналізувалися особливості взаємодії елементарних частинок елементів та речовин з бозоном Хіггса та фотонами. Можливими елементами на початку Періодичної таблиці розглядаються фотон і Бозон Хіггса. Математичний аналіз підтверджує можливість знаходження нових елементів на початку Періодичної таблиці – як і вважав Д.І. Менделєєв.

UDC 004.942 ; 54 ; 087 ; 078

**A mathematical model of the properties of inert gases and new elements at the beginning of the Periodic Table** / Beketov N.M. // *Mathematical modeling in economy*. – 2020. – № 1. – P. 100–109.

Based on the data of chemical elements, regularities of the properties of inert gases were revealed and mathematical modeling was carried out to predict the properties of new elements at the beginning of the Periodic Table Mendeleev's edition of 1905 and at the beginning of the Spatial Model of the Periodic Law of Chemical Elements. The study was based on an analysis of the atomic numbers of elements, the relative atomic masses of elements, the maximum number of electrons by energy levels in inert gases, the ratio of the properties of elements and structural features of their atoms, nuclear synthesis of elements, the features of ionization of elements and substances, the features of the interaction of elementary particles of elements and substances with the Higgs boson and photons. Possible elements at the beginning of the Periodic Table are the photon and the Higgs boson. Mathematical analysis confirms the possibility of finding new elements at the beginning of the Periodic Table – 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).

**Васянін Володимир Олександрович** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України (Україна, м. Київ).

**Горбулін Володимир Павлович** – академік НАН України, перший віце-президент НАН України (Україна, Київ).

**Задунай Олексій Сергійович** – кандидат технічних наук, начальник центру Державного науково-дослідного інституту спеціального зв'язку та захисту інформації (Україна, м. Київ).

**Заяць Юрій Васильович** – директор транспортної компанії (Україна, м. Київ).

**Зозуля Андрій Миколайович** – аспірант кафедри комп'ютерних наук, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (Україна, м. Тернопіль).

**Коваленко Олександр Васильович** – кандидат технічних наук, завідувач лабораторією ФТПДЯВ Інституту ядерних досліджень НАН України (Україна, м. Київ).

**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).

**Vasyanin Volodymyr** – Doctor of sciences (Eng.), Senior Research Fellow, Lead researcher of Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine (Ukraine, Kyiv).

**Horbulin Volodymyr** – Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, the First Vice-President of the National Academy of Sciences of Ukraine (Ukraine, Kyiv).

**Zadunaj Oleksiy** – PhD (Technical Science), Head of center of State Research Institute for Special Telecommunication and Information Protection (Ukraine, Kyiv).

**Zaiats Yurii** – Director of a transport company (Ukraine, Kyiv).

**Zozulia Andriy** – Postgraduate Student, Department of Computer Science, Ternopil Ivan Puluiy National Technical University (Ukraine, Ternopil).

**Kovalenko Oleksandr** – PhD, Head of laboratory Physical and Technical Problems of Nuclear Radiation Sources, Institute for Nuclear Research of NAS of Ukraine (Ukraine, Kyiv).

**Кряжич Ольга Олександрівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмування та математики Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Україна, м. Сєвєродонецьк).

**Курило Анатолій Васильович** – аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України (Україна, м. Київ).

**Литвиненко Ярослав Володимирович** – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (Україна, м. Тернопіль).

**Лифар Володимир Олексійович** – доктор технічних наук, завідуючий кафедрою програмування та математики Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Україна, м. Сєвєродонецьк).

**Лупенко Сергій Анатолійович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерних систем та мереж, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (Україна, м. Тернопіль).

**Ониськів Петро Анатолійович** – аспірант кафедри комп'ютерних наук, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (Україна, м. Тернопіль).

**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).

**Ратов Денис Валентинович** – старший викладач кафедри програмування та математики Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (Україна, м. Сєвєродонецьк).

**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).

**Kryazhych Olha** – PhD, Associate Professor of Department of Programming and Mathematics, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University Ukraine (Ukraine, Severodonetsk).

**Kurilo Anatoliy** – PhD student, Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine (Ukraine, Kyiv).

**Lytvynenko Yaroslav** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor, Department of Computer Science, Ternopil Ivan Puliuy National Technical University (Ukraine, Ternopil).

**Lyfar Volodymyr** – Doctor of sciences (Engineering), Head of the department of programming and mathematics, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University (Ukraine, Severodonetsk).

**Lupenko Serhii** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Computer Systems and Networks, Ternopil Ivan Puliuy National Technical University (Ukraine, Ternopil).

**Onyskiv Petro** – Postgraduate Student, Department of Computer Science, Ternopil Ivan Puliuy National Technical University (Ukraine, Ternopil).

**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).

**Ratov Denis** – Senior lecturer in mathematics and programming, The Volodymyr Dahl East Ukrainian University (Ukraine, Severodonetsk).

**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).

**Сметанін Кирило Володимирович** – кандидат технічних наук, викладач кафедри захисту інформації та кібербезпеки Житомирського військового інституту імені С.П. Корольова (Україна, м. Житомир).

**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).

**Триснюк Василь Миколайович** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України (Україна, м. Київ).

**Триснюк Тарас Васильович** – кандидат технічних наук, науковий співробітник Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України (Україна, м. Київ).

**Трофимчук Олександр Миколайович** – доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НАН України, директор Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України (Україна, м. Київ).

**Ушакова Людмила Павлівна** – провідний інженер Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України (Україна, м. Київ).

**Smetanin Kirill** – Candidate of Science (Engineering), Lecturer at the Department of Information Security and Cyber Security of the Zhytomyr Military Institute named after S.P. Korolyov (Ukraine, Zhytomyr).

**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).

**Trysnyuk Vasyi** – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Senior Researcher Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine (Ukraine, Kyiv).

**Trysnyuk Taras** – Candidate of Science in Technology, a researcher at the Institute of Telecommunications and the Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine (Ukraine, Kyiv).

**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).

**Ushakova Liudmyla** – Lead Engineer of Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine (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 10.03.2020. Формат 70X108/16. Папір офсетний.  
Офсетний друк. Умовн. друк. арк. 11.6  
Обл.-вид. арк. 12.1      Тираж 300 примірників      Замовлення №       

---

КИЇВ 2020