

*Електронний журнал «Ефективна економіка» включено до переліку наукових фахових видань України з питань економіки (Категорія «Б», Наказ Міністерства освіти і науки України № 975 від 11.07.2019). Спеціальності – 051, 071, 072, 073, 075, 076, 292. Ефективна економіка. 2024. № 8.*

**DOI: <http://doi.org/10.32702/2307-2105.2024.8.26>**

**УДК 330.3**

*О. А. Сергієнко,*

*д. е. н, професор, професор кафедри підприємництва, торгівлі і логістики,*

*Національний технічний університет*

*«Харківський політехнічний інститут»*

*ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9796-9218>*

*П. О. Самусь,*

*аспірант, Національний технічний університет*

*«Харківський політехнічний інститут»*

*ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8563-2650>*

*І. І. Соснов,*

*к. е. н., доцент, доцент кафедри підприємництва, торгівлі і логістики,*

*Національний технічний університет*

*«Харківський політехнічний інститут»*

*ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0027-5488>*

**МОДЕЛЬ АНАЛІЗУ СТІЙКОСТІ ІНВЕСТИЦІЙНИХ  
ПРОЦЕСІВ НА ПРИКЛАДІ ІННОВАЦІЙНОГО  
СТАРТАП-ПРОЄКТУ**

*O. Serhiienko,*

*Doctor of Economic Sciences, Professor, Professor of the Department of  
Entrepreneurship, Trade and Logistics, National Technical University  
"Kharkiv Polytechnic Institute"*

*I. Sosnov,*

*PhD in Economics, Associate Professor, Associate Professor of the Department of  
Entrepreneurship, Trade and Logistics, National Technical University  
"Kharkiv Polytechnic Institute"*

*P. Samus,*

*Postgraduate student, National Technical University  
"Kharkiv Polytechnic Institute"*

## **SUSTAINABILITY ANALYSIS MODEL FOR INVESTMENT PROCESSES: A CASE STUDY OF AN INNOVATIVE STARTUP PROJECT**

*У статті досліджено сутність категорії стійкості інвестиційного проекту в умовах невизначеності зовнішнього середовища.*

*Забезпечення стійкості інвестиційних проєктів є критично важливим завданням в умовах високої невизначеності та мінливості зовнішнього середовища. Здатність проєкту протистояти негативним впливам, адаптуватися до змін та досягати поставлених цілей визначає його успіх та ефективність інвестицій.*

*В наукових працях як вітчизняних, так і зарубіжних фахівців висвітлюються різні аспекти забезпечення стійкості інвестиційних проєктів, зокрема, вплив факторів зовнішнього середовища, методи оцінки ризиків, застосування адаптивних підходів в управлінні проєктами. Проте, питання комплексної оцінки стійкості з урахуванням невизначеності зовнішніх умов потребує подальшого вивчення.*

*Мета даної роботи полягає в узагальненні теоретичних підходів та розробці практичних рекомендацій щодо аналізу і забезпечення стійкості*

*інвестиційних проєктів в нестабільних умовах зовнішнього середовища. Для досягнення поставленої мети передбачається виконання таких завдань: проаналізувати вплив факторів невизначеності зовнішнього середовища на інвестиційні проєкти, розглянути методичні підходи до оцінки стійкості проєктів, сформулювати рекомендації щодо вибору стратегій та інструментів забезпечення стійкості на різних етапах реалізації проєктів.*

*The article examines methods for assessing the sustainability of investment projects, particularly in the face of uncertainty in the external environment. Volatility in economic, political, legal and other external factors creates risks that can negatively impact project goals, costs and timelines. Ensuring project sustainability is thus critically important for successful implementation and return on investment.*

*The research investigates theoretical approaches to defining and evaluating investment project sustainability while considering external uncertainty impacts. It analyzes existing qualitative and quantitative assessment methods, including application of control theory techniques like the Nyquist, Mikhailov and Routh-Hurwitz criteria. These frequency response methods allow modeling a project's transfer function to identify potential instabilities, volatility and deviations from desired performance due to disturbances. The analysis highlights how building an accurate model of the project's dynamics and studying its stability characteristics can reveal vulnerabilities to external shocks before they manifest.*

*For investment projects like startups operating in highly dynamic and unpredictable environments, such sustainability analysis is crucial. It enables project managers to evaluate inherent risks, detect vulnerabilities, and implement adaptive strategies to increase resilience against disruptions. Investors can also use these analytical approaches to make more informed decisions about a project's viability and robustness before committing capital. With insights from sustainability modeling, both project leaders and investors can take preemptive actions to fortify the project against potential deviations from the planned trajectory.*

*The paper provides practical recommendations on selecting appropriate sustainability assessment methods and tools based on the project's characteristics, industry factors and the degree of external uncertainty. Emphasizing adaptive management approaches, the findings offer a framework to enhance the stability and success rate of investment projects amid external volatility. Real-world applications demonstrate how systematic sustainability analysis allows proactive risk mitigation, agile adaptation to changes, and ultimately higher chances of achieving the desired investment outcomes despite environmental turbulence.*

**Ключові слова:** *стійкість, інвестиційний проєкт, невизначеність, зовнішнє середовище, ризики.*

**Keywords:** *sustainability, investment project, uncertainty, external environment, risks.*

## **ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ**

У сучасному світі інвестиції в стартапи відіграють критичну роль для розвитку інновацій та підприємництва. Однак, висока невизначеність та мінливість зовнішнього середовища створюють значні ризики для інвестиційних проєктів. Забезпечення стійкості інвестиційних проєктів в умовах невизначеності стає ключовим завданням для успішної реалізації та отримання очікуваної віддачі від інвестицій. Існуючі підходи до оцінки стійкості проєктів часто не враховують комплексний вплив зовнішніх факторів та динаміку розвитку стартапів. Тому розробка ефективних методів аналізу та забезпечення стійкості інвестиційних проєктів, особливо в сфері інноваційних стартапів, є актуальною науковою та практичною задачею.

## **АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПУБЛІКАЦІЙ**

В наукових працях як вітчизняних, так і зарубіжних фахівців висвітлюються різні аспекти забезпечення стійкості інвестиційних проєктів. Зокрема, Малиновська Ю., Орищин Н., Парацин О. та Хом'як Я. досліджували моделювання інноваційних та інвестиційних стратегій підприємств. Мазур Д., Мазур А., Мазур Г. та Кобі А. розглядали фінансове моделювання як інструмент вирішення основних проблем підприємства.

Юхименко Г.К. та Лазаренко І.С. запропонували моделювання інвестиційного фонду акцій із застосуванням стратегій управління фінансовими деривативами та хеджування. Олешко Т., Попік Н. та Турченко Д. досліджували процес моделювання ризиків фінансових інвестицій. Герц Д.Б. розглядав аналіз ризиків у капітальних інвестиціях. Проте, питання комплексної оцінки стійкості з урахуванням невизначеності зовнішніх умов, особливо в контексті стартап-проектів, потребує подальшого вивчення. За даними Statista, розподіл джерел фінансування стартапів у Європі є досить різноманітним, що підкреслює важливість розуміння стійкості проектів для різних типів інвесторів. Дослідження Exploding Topics показує високий рівень невдач стартапів, що ще раз підкреслює необхідність розробки ефективних методів оцінки стійкості інвестиційних проектів.

### **МЕТА СТАТТІ**

Метою даної роботи є розробка та апробація комплексного підходу до оцінки та аналізу стійкості інвестиційних проектів на прикладі інноваційних стартапів. Для досягнення цієї мети поставлено наступні завдання: проаналізувати вплив факторів невизначеності зовнішнього середовища на інвестиційні проекти; розглянути існуючі методичні підходи до оцінки стійкості проектів; розробити модель оцінювання стійкості інвестиційного стартап-проекту з використанням функції передачі системи та критеріїв стійкості; провести апробацію запропонованого підходу та сформулювати практичні рекомендації щодо забезпечення стійкості інвестиційних проектів.

### **ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ**

Забезпечення стійкості інвестиційних проектів є критично важливим завданням в умовах високої невизначеності та мінливості зовнішнього середовища. Здатність проекту протистояти негативним впливам, адаптуватися до змін та досягати поставлених цілей визначає його успіх та ефективність інвестицій.

Інвестиції в стартапи відіграють критичну роль у сучасному світі інновацій та підприємництва. Без зовнішнього фінансування більшість стартапів не могли б реалізувати свої ідеї або масштабувати свою діяльність, що робить інвестиції життєво необхідними для їхнього виживання та росту.

Для засновників інноваційних стартап проєктів, отримання інвестицій не просто про фінанси. Це про валідацію їхньої бізнес-моделі, доступ до цінних ресурсів, менторства та мережі контактів, які можуть допомогти їм уникнути поширених пасток і прискорити зростання. Інвестиції також дозволяють стартапам інвестувати в дослідження та розробку, маркетинг та розширення команди, що є критично важливим для підтримки інновацій та конкурентоспроможності.

З іншого боку, інвестори шукають не лише інвестиційні можливості з високим потенціалом доходу, але й проєкти з міцною основою та чітким розумінням ринкових потреб. Вони прагнуть до детального аналізу ризиків та потенціалу зростання, а також до оцінки стійкості стартапу перед зовнішніми та внутрішніми викликами. Стійкість проєкту, його здатність адаптуватися до змін умов та витримати потенційні кризи, стає ключовим фактором для інвесторів при прийнятті рішення про інвестування.

За даними досліджень, значна частина стартапів не досягає успіху, що підкреслює ризики, пов'язані з інвестиціями в нові підприємства. Наприклад, згідно з дослідженням від CB Insights, близько 38% стартапів, зазнають невдачі через проблеми з інвестиціями, або брак коштів на певному етапі (Рис. 1) [1]. Ця аналітика підкреслює важливість ретельного аналізу та оцінки стартапів перед інвестуванням для інвестора, і саме розробка моделі аналізу стійкості інвестиційного проєкту з одного боку дозволить інвестору пересвідчитись і об'єктивно оцінити проєкт перед інвестуванням[2]. А з іншого боку так модель буде доказом проведеної роботи для стартапера, щоб отримати довіру інвестора.

Оскільки багато стартапів пропонували кілька причин своїх невдач, ви побачите, що діаграма, яка виділяє основні причини, не становить 100% (вона значно перевищує його).

Враховуючи важливість інвестицій для стартапів та інтереси інвесторів у забезпеченні стійкості своїх інвестицій, розробка ефективних методів аналізу стійкості самого процесу розвитку стає ключовою для підтримки інноваційного розвитку та забезпечення довгострокового успіху інвестиційних проєктів.



**Рис. 1. Розподіл причин невдачі стартап-проектів**

*Джерело: сформовано на основі [1; 2].*

У контексті сучасних викликів, з якими стикається Україна, важливість розробленої моделі аналізу стабільності інвестиційного проекту стає особливо актуальною. В умовах економічної невизначеності, посилення соціальних та екологічних вимог, забезпечення стабільності інвестицій стає ключовим фактором ефективності та стійкості розвитку бізнесу. Згідно з оцінкою Всесвітнього банку, економіка України, попри виклики, продемонструвала вражаючу стійкість, з очікуваним зростанням на 3,5% у 2023 році після майже 30% спаду у 2022 році. Це підкреслює необхідність адаптації інвестиційних стратегій до змінних умов, забезпечуючи при цьому їх стійкість і здатність до відновлення [3].

Інвестиційний проект може мати тривожні наслідки, вплив яких може призвести до недосягнення або неповного досягнення цілей проекту. Проблему аналізу та оцінки інвестиційного проекту слід розглядати у зв'язку з необхідністю запобігання або мінімізації наслідків цих порушень.

Здатність проекту як системи досягти своєї мети функціонування при певних змінах середовища його реалізації в умовах зовнішніх і внутрішніх порушень визначається такою системною характеристикою, як стабільність, тому моделювання інвестиційних проектів повинно включати аналіз

стійкості на певному визначеному часовому інтервалі. Моделювання стійкості інвестиційного проекту повинно здійснюватися з використанням системного аналізу, методів загальної теорії систем, а також використання деяких положень теорії автоматичного управління для аналізу і синтезу систем управління. Крім того, така модель повинна дозволяти змінювати параметри і структуру управління з метою забезпечення стабільної роботи системи при зміні характеристик внутрішнього і зовнішнього середовища об'єкта, тобто бути адаптивною моделлю системи управління реалізацією інвестиційного проекту.

Одним із методів аналізу стійкості інвестиційних проектів є вивчення функції передачі проекту з метою виявлення можливих відхилень в його роботі під впливом збурень, а також визначення зони стійкості проекту. Такий підхід дозволить проаналізувати динаміку поведінки системи, відобразити зміни, які відбуваються в ній, що дозволить спроектувати стійку, адаптивну систему при зміні характеристик внутрішнього і зовнішнього середовища об'єкта.

Аналіз стійкості в інвестиційних проектах займає ключове місце у стратегії управління ризиками, дозволяючи інвесторам та власникам проектів оцінити потенційний вплив як зовнішніх, так і внутрішніх змін на проект. Цей аналіз є особливо важливим в умовах економічної непередбачуваності, де фактори на кшталт макроекономічних коливань, політичної нестабільності та змін в законодавстві можуть істотно вплинути на успіх проекту. Надаючи глибоке розуміння потенційних ризиків, аналіз стійкості сприяє у прийнятті обґрунтованих рішень, спрямованих на мінімізацію негативного впливу цих факторів на проект.

Крім того, як зазначається в статті "Risk Analysis in Capital Investment" з Harvard Business Review"[4] математичні формули, які передбачають єдину норму прибутку або "найкращу оцінку", недостатні. Підхід автора акцентує увагу на природі та обробці використаних даних та конкретних комбінаціях змінних, таких як грошовий потік, норма прибутку на інвестиції та множинність ризиків, що виникають у кожній ситуації." Це підкріплює ідею про те, що якісний та кількісний аналіз стійкості стає невід'ємною частиною управління інвестиційними проектами, дозволяючи знизити ризики та

підвищити ймовірність успішної реалізації проєктів навіть в умовах високої економічної та ринкової невизначеності [4].

Таким чином, інтеграція глибокого аналізу стійкості з урахуванням різноманітних ризиків і використання комплексних методів оцінки є ключовою для забезпечення стабільного розвитку та успіху інвестиційних проєктів.

Метою роботи є оцінка та аналіз стійкості інвестиційного проєкту на прикладі інноваційного стартапу шляхом побудови його трансферної функції та застосування математичних методів оцінки стійкості, таких як критерії Раус-Гурвіца, Михайлова та Найквіста.

Об'єктом дослідження є процес стійкості інвестиційного інноваційного проєкту. Предметом дослідження є моделі оцінювання стійкості інвестиційного стартап-проєкту з використанням функції передачі системи та критеріїв стійкості.

На сьогоднішній день стійкість інвестиційних проєктів розглядається в основному з якісної сторони і не достатньо формалізовано. Слід зазначити, що деякі методи, розроблені та застосовані для аналізу стійкості технічних систем, можуть бути досить успішно застосовані при аналізі економічних, фінансових процесів і систем, зокрема стартап-проєктів. Під стійкістю інвестиційного інноваційного проєкту розуміється здатність проєкту досягти свого цільового призначення при певних змінах навколишнього середовища його реалізації в умовах зовнішніх і внутрішніх викликів [3].

Для побудови моделі оцінювання та подальшого аналізу стійкості проєкту, реалізована побудова функції передачі, застосування основних властивостей  $z$ -перетворень для вивчення поведінки процесу, а також дослідження стійкості частотними методами [5]. Враховуючи дискретність інвестиційного проєкту, можна застосувати до його опису функцію передачі системи (функціонально-комплексна змінна  $z$ ), яка встановлює відповідність між вхідними і вихідними сигналами і має наступну форму. (Рис. 2)

$$W(z) = \frac{Y(z)}{X(z)}$$

**Рис. 2. Функціонально-комплексна змінна  $z$**

*Джерело: сформовано на основі [6].*

де  $X(z)$  -  $z$ -перетворення вхідної функції  $x(t)$ , що показує залучення інвестиційних коштів;

$Y(z)$  - це  $z$ -трансформація вихідної функції  $y(t)$ , яка відображає фінансовий результат від інвестиційної діяльності.

$Z$ -перетворення (або дискретне перетворення Лапласа) застосовується через дискретність інвестиційного проєкту як системи і дозволяє замінити досить складне рішення диференціальних рівнянь відносно простим алгебраїчним рішенням [6].

Параметри трансферної функції в системі реалізації інвестиційного проєкту визначаються на основі основних тенденцій перехідного процесу, за запропонованим у статті методом [6]: Спадна тенденція виробництва за рахунок реорганізації; тенденція зростання обсягів виробництва; тенденція часових переваг, пов'язана з адаптивним управлінням під час перехідного процесу. Отже, розглянуто основні тенденції перехідного процесу в діяльності інвестора на основі економічних законів і правил. Ці тенденції у вигляді модифікованих експонентів, і в той же час є першими компонентами визначеного часового ряду. Параметри цих кривих визначаються функціональними та вартісними характеристиками стартапу, що отримує інвестиції.

Загальний вираз залежності фінансових результатів ( $y(t)$ ) час від часу має наступний вигляд. (Рис. 3)

$$y(t) = \sum_{n=1}^m y_n = a_0 + (a_1 - a_0)e^{-b_0 t} + (a_2 - a_0)(1 - e^{-b_1 t}) + b_2 t e^{-b_1 t}.$$

**Рис. 3. Загальний вираз залежності фінансових результатів**

*Джерело: сформовано на основі [6].*

Даний вираз побудований на основі трендів інвестиційного проєкту, а параметри  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  визначаються характеристиками інвестиційного об'єкта і бізнес-плану проєкту, і розраховуються в результаті симуляції імітаційної моделі.

Для оцінки стійкості інвестиційного проєкту використовується ряд критеріїв, наприклад, алгебраїчний критерій Рауса-Гурвіца, частотні методи Михайлова і Никвіста з визначеною функцією передачі (Рис. 4).

$$W(z) = \frac{P(z)}{Q(z)}$$

**Рис. 4. Функція передачі**  
Джерело: сформовано на основі [6].

Де  $P(z)$  і  $Q(z)$  є поліномами, що мають наступну форму (Рис. 5).

$$\begin{cases} Q(z) = (z - 1)(z - d_0)(z - d_1)^2 \\ P(z) = \frac{1}{V_p} \left[ \begin{aligned} &a_0(z - d_0)(z - d_1)^2 + (a_1 - a_0)(z - 1)(z - d_1)^2 - \\ &-(a_2 - a_0)(z - 1)(z - d_0)(z - d_1) + \\ &+ b_2 \tau d_1 (z - 1)(z - d_0) \end{aligned} \right] \end{cases}$$

**Рис. 5. Поліноми  $P(z)$  і  $Q(z)$**   
Джерело: сформовано на основі [7].

Стабільність системи за критерієм Раус-Гурвіц може бути визначена його моделлю в змінних станах системи. Якщо системі задана функція передачі (Рис. 5), її стійкість визначається корінням характеристичного рівняння. Щоб система була стабільною, всі корені цього рівняння повинні бути розташовані в лівій половині  $Z$ -площини. Значення коренів характеристичного рівняння можна визначити за критерієм Раус-Гурвіц.  $Q(z) = 0$ . Для застосування цього методу, характеристичне рівняння повинно бути представлено в загальному вигляді (Рис. 6).

$$Q(z) = a_n z^n + a_{n-1} z^{n-1} + \dots + a_1 z + a_0 = 0$$

**Рис. 6. Характеристичне рівняння Раус-Гурвіца**  
Джерело: сформовано на основі [8].

Даний критерій є необхідною і достатньою умовою, оскільки заснований на впорядкуванні коефіцієнтів характеристичного рівняння (Рис. 6), і може бути представлений у наступному загальному вигляді (Рис. 7).

	1	2	3
$z^n$	$a_n$	$a_{n-2}$	$a_{n-4}$
$z^{n-1}$	$a_{n-1}$	$a_{n-3}$	$a_{n-5}$
$z^{n-2}$	$b_{n-1}$	$b_{n-3}$	$b_{n-5}$
$z^{n-3}$	$c_{n-1}$	$c_{n-3}$	$c_{n-5}$
...	...	...	...
$z^0$	$h_{n-1}$		

**Рис. 7. Загальний вигляд таблиці Рауса**

*Джерело: сформовано на основі [8].*

Цей критерій вимагає, щоб перший стовпчик таблиці не змінював знак, щоб він був стабільним. Недоліком критерію Раус-Гурвіц є те, що він не дає можливості з'ясувати, як змінити параметри в разі нестабільності системи, щоб зробити її стійкою; тобто визначити відносну стабільність, оцінену фактичною частиною кожного кореня або парою коренів характеристичного рівняння [3, с. 314].

Критерій стабільності Михайлова дозволяє оцінити стабільність системи на основі годографа певної функції. Характеристичне рівняння системи має наступний вигляд (Рис. 8).

$$a_0(z - z_1)(z - z_2) \dots (z - z_n) = a_0 \prod_{i=1}^n (z - z_i) = 0$$

**Рис. 8. Характеристичне рівняння системи**

*Джерело: сформовано на основі [9].*

Для інвестиційного проєкту критерій стійкості Михайлова сформульований наступним чином. (Рис. 9) Знаменник функції передачі в  $4J$  є:  $\leq \infty$

$$Q_S(z) = (z - 1)(z - d_0)(z - d_1)^2$$

**Рис. 9. Критерій стійкості Михайлова**

*Джерело: сформовано на основі [9].*

Для застосування критерію Михайлова необхідно розглянути коло одиничного радіуса в комплексній площині. Оскільки  $z$  є складною змінною

для переходу, давайте представимо її як  $e^{j\phi}$ , де  $\phi$  - дійсна змінна,  $j$  - є уявною одиницею, а оскільки ряд комплексного числа є визначальним рядком  $\cos(\phi)$  і  $\sin(\phi)$ , вираз зображено далі (Рис. 10).

$$z = \cos(\phi) + j \sin(\phi).$$

**Рис. 10. Складна змінна  $z$**   
Джерело: сформовано на основі [9].

Критерій Михайлова можна застосувати в наступному формулюванні:

1) для стабільності дискретної системи, досить, щоб годограф знаменника  $Q(z)$  функції передачі системи  $F(z)$  при єдиній зміні  $z$  в комплексній площині по колу одиничного радіусу від точки з координатами  $re=1$  і  $Im=0$  проти годинникової стрілки після повороту  $(0\phi 2\pi)$  охопив походження з комплексною площиною  $n$  разів;

2) якщо система нестабільна, то число коренів за межами одиничного кола (порядку нестабільності) дорівнює різниці між поліноміальним ступенем і числом обертів годографа навколо походження.  $Q(z)$  є поліноміальним типом зображенням на (Рис. 11).

$$Q(z) = z^4 + Az^3 + Bz^2 + Cz + D;$$

$$\downarrow$$

$$A = -d_0 - 2d_1 - 1;$$

$$B = d_0 + 2d_0d_1 + 2d_1 + d_1^2;$$

$$C = -2d_0d_1 - 2d_0d_1^2 - 2d_1^2;$$

$$D = d_0d_1^2.$$

**Рис. 11. Поліноміальний тип  $Q(z)$**   
Джерело: сформовано на основі [10].

$Q(z)$  має чотири корені. Групуючи поліноміальні частини так, щоб розділити фактичні та уявні частини, ми отримуємо, результат (Рис. 12).

$$Q(\phi) = Q_{\text{вещ}}(\phi) + jQ_{\text{мним}}(\phi).$$

**Рис. 12. Згруповані поліноміальні частини**  
Джерело: сформовано на основі [10].

Після цього ми отримуємо, результат (Рис. 13).

$$Q_{\text{реальні}}(\phi) = \cos^4 \phi - 6 \cos^2 \phi \sin^2 \phi + \sin^4 \phi + A(\cos^3 \phi - 3 \cos \phi \sin^2 \phi) + B(\cos^2 \phi - \sin^2 \phi) + C \cos \phi + D;$$

$$Q_{\text{уявні}}(\phi) = 4 \cos^3 \phi \sin \phi - 4 \cos \phi \sin^3 \phi + A(3 \cos^2 \phi \sin \phi - \sin^3 \phi) + B(2 \cos \phi \sin \phi) + C \sin \phi.$$

**Рис. 13. Фіналізований вираз критерію Михайлова**

*Джерело: сформовано на основі [11].*

Застосування критерію Михайлова, а також критерію Найквіста дозволяє з затримкою досліджувати стабільність лінійних систем. Оскільки інвестиційний проєкт є системою, в якій існує природне відставання часу між інвестиціями і отриманням прибутку, застосування цих критеріїв є пріоритетним.

Критерій Найквіста має перевагу, бо може бути застосований, коли диференціальні рівняння системи невідомі, але відомі лише їх частотні характеристики, які можуть бути визначені експериментально. Для визначення стабільності закритої системи за допомогою критерію стійкості Найквіста необхідно дослідити типове характеристичне рівняння, представлене (Рис. 14).

$$F(z) = 1 + L(z) = 0$$

**Рис. 14. Характеристичне рівняння Найквіста**

*Джерело: сформовано на основі [11].*

Наступним кроком необхідно отримати карту Найквіста контуру за допомогою характерного багаточлена форми зображеної на (Рис. 14) і підрахувати число початку координат скопів на  $F(z)$ -площині. Контур Найквіста - це контур, що охоплює всю праву половину  $Z$ -площини, який включає всю уявну вісь координат. Коло замкнулося півколом радіуса  $r$ , де  $r \rightarrow -j\infty + j\infty$ . В іншому випадку кількість обхватів можна розрахувати за допомогою наступного перетворення зображеного на (Рис. 15).

$$F'(z) = F(z) - 1 = L(z)$$

**Рис. 15. Рівняння розрахунку кількості обхватів**

*Джерело: сформовано на основі [11].*

За годинниковою стрілкою покриття походження на  $F(z)$  площини еквівалентне за годинниковою стрілкою покриття  $-1$  точки на  $L(z)$  площини. Далі потрібно розглянути поняття нулів і полюсів системи.

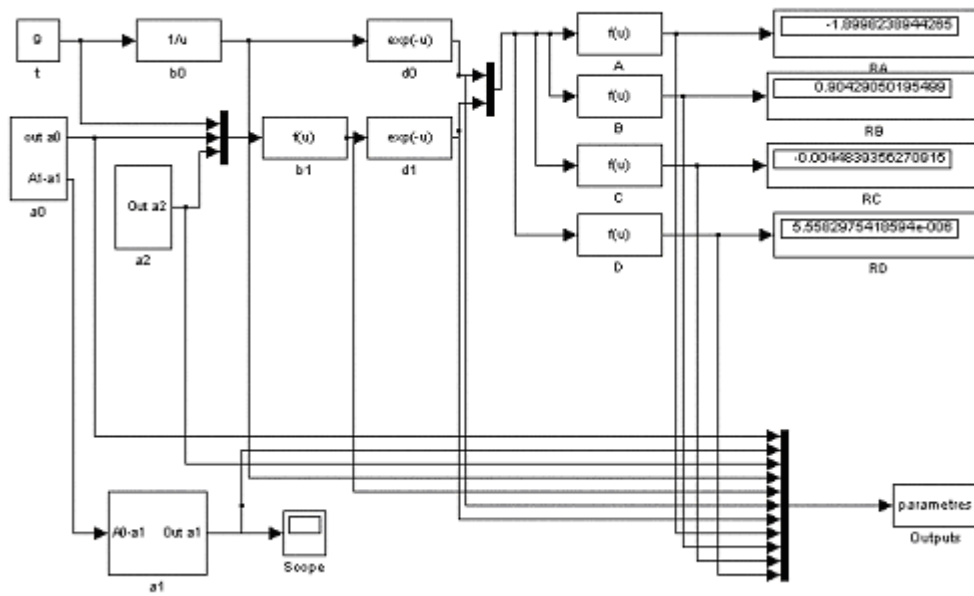
Найквістський критерій сформульований наступним чином: якщо відкрита система стабільна, тобто кількість полюсів функції  $L(z)$  у правій половині  $Z$ -площини дорівнює нулю ( $P=0$ ), то замкнута система є стабільною тоді і тільки тоді, коли петля площини  $GLon L(z)$  не охоплює точку  $(-1, j0)$  [11]. Якщо кількість полюсів  $L(z)$  у правій половині площини відрізняється від нуля, то критерій формулюється таким чином: замкнута система є стабільною тоді і тільки тоді, коли кількість точок  $GLpoints$  проти годинникової стрілки  $(-1, j0)$  дорівнює кількості полюсів функції  $L(z)$ , що мають позитивну дійсну частину. Для критерію Найквіста важлива точка  $(-1, j0)$  в комплексній площині. Близькість годографа до цієї точки є мірою відносної стійкості системи.

Аналіз стійкості інвестиційного стартап-проєкту – це багатокроковий складний процес.

1. Перший етап - побудова функції передачі і формування характеристичного рівняння системи. Дана модель забезпечує характерний багаточлен системи, за допомогою якого, застосовуючи описані вище критерії, можна зробити висновки про стійкість системи.
2. Другий етап - побудова моделі, яка дозволила б дослідити основні тенденції перехідного процесу і на їх основі розрахувати коефіцієнти характеристичного полінома. Для побудови моделі був використаний програмний комплекс *MATLAB/SIMULINK*.

Параметри вводу моделі - це значення, які характеризують стартап проєкт. Параметри моделі та коефіцієнти характеристичного полінома виводяться саме з цих даних.

Побудована модель перетворює вхідні дані в коефіцієнти характеристичного багаточлена. У той же час, модель дозволяє моделювати процес для визначення впливу вхідних даних системи на значення коефіцієнта і, таким чином, на стабільність системи. Модель аналізу коефіцієнтів характеристичного полінома системи управління інвестиційними проєктами в пакеті *Simmulnk* (Рис. 16).



**Рис. 16.** Модель аналізу коефіцієнтів характеристичного полінома системи управління інвестиційними проєктами в пакеті *Simmulnk*

*Джерело: сформовано на основі [12].*

Таким чином, функція переходу має наступну форму, зображену на (Рис. 17).

$$W(z) = \frac{P(z)}{Q(z)} = \frac{151650.03 * (z - 0.894839) * (z - 0.002492)^2 + 69518.97 * (z - 1) * (z - 0.002492)^2 - 2863.97 * (z - 1) * (z - 0.894839) * (z - 0.002492) + 188362,8234 * 0.002492 * (z - 1) * (z - 0,894839)}{18000000 * (z - 1)(z - 0.894839)(z - 0.002492)^2}$$

**Рис. 17.** Реальні та уявні частини характеристичного полінома

*Джерело: сформовано на основі [13].*

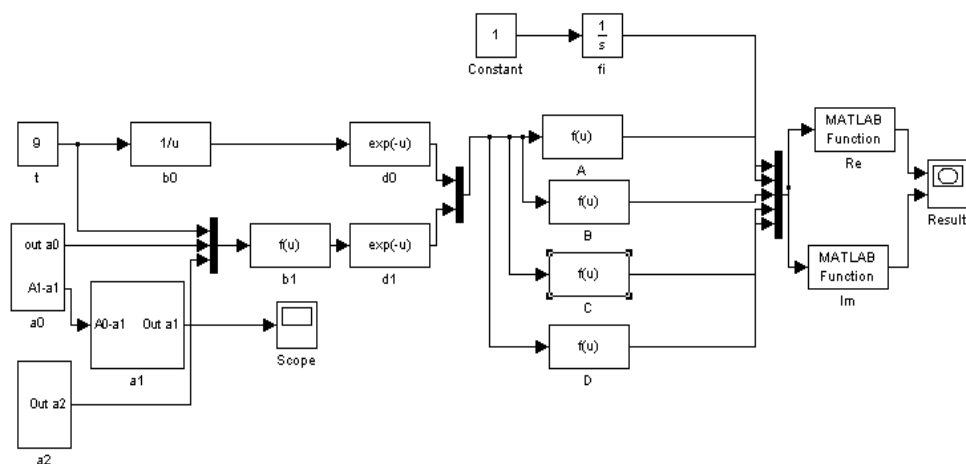
Відповідно до вимог використання критерію Михайлова, слід отримати годограф, на основі якого можна було визначити стійкість або нестабільність інвестиційних процесів стартап-проєкту.

Для побудови годографа необхідно отримати реальну і уявну частину характеристичного багаточлена, що можливо на основі формул (Рис. 17). Реальні та уявні частини характеристичного полінома представлені на (Рис. 18).

$$\begin{aligned} Q_{\text{реальні}}(\phi) &= \cos^4 \phi - 6 \cos^2 \phi \sin^2 \phi + \sin^4 \phi - \\ &- 1,899824 * (\cos^3 \phi - 3 \cos \phi \sin^2 \phi) + \\ &0,904291 * (\cos^2 \phi - \sin^2 \phi) - 0,004484 * \cos \phi + 0,000056; \\ \\ Q_{\text{уявні}}(\phi) &= 4 \cos^3 \phi \sin \phi - 4 \cos \phi \sin^3 \phi - \\ &- 1,899824 * (3 \cos^2 \phi \sin \phi - \sin^3 \phi) + \\ &+ 0,904291 * (2 \cos \phi \sin \phi) - 0,004484 * \sin \phi. \end{aligned}$$

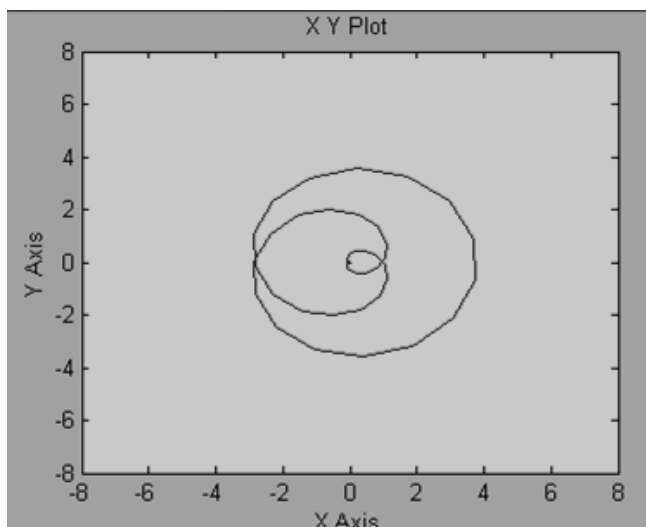
**Рис. 18. Реальні та уявні частини характеристичного полінома**  
*Джерело: сформовано на основі [13].*

В результаті реалізації моделі отримано годограф, на основі якого використовується критерій Михайлова, модель аналізу його стійкості зображена на (Рис. 19), для висновків про стійкість інвестиційного стартап-проєкту. Використовуючи результати моделювання, можна зробити висновок про стійкість інвестиційного проєкту щодо змін внутрішніх та зовнішніх факторів.



**Рис. 19. Модель аналізу стійкості інвестиційного проєкту за критерієм Михайлова**

*Джерело: сформовано на основі [14].*



**Рис. 20. Графічне трактування інвестиційного проєкту - годограф знаменника перехідної функції**

*Джерело: сформовано на основі [15].*

Побудована модель дозволяє аналізувати значення параметрів, при яких змінюється поведінка проєкту, що відбивається в графічному поданні поведінки системи на (Рис. 20). В рамках вирішення питання оцінки стійкості інвестиційного процесу стартап- проєктів, є практичний інтерес пілотувати експертизу реакції системи на зміни початкових параметрів і виявлення тих ключових моментів, які приведуть проєкт до стійких або

навіть більш нестабільних станів, а також тих, що ведуть проєкт в критичну зону.

Для застосування критерію Рауса-Гурвіца для оцінки стійкості інвестиційного проєкту, характерне рівняння системи управління реалізацією інвестиційного стартап-проєкту. Характеристичне рівняння записується таким чином як зображено на на (Рис. 21).

$$Q(z) = z^4 - 1,899824 * z^3 + 0,904291 * z^2 - 0,004484 * z + 0,000056 = 0$$

**Рис. 21. Застосування критерію Рауса-Гурвіца для оцінки стійкості інвестиційного проєкту**

*Джерело: сформовано на основі [15].*

Пакет *MATLAB* визначає кількість коренів характерного багаточлена, розташованого в правій половині площини. На (Рис. 22) наведено програму реалізації побудови коренів характеристичного рівняння.

```
>> q = [1 -1,899824 0,904291 -0,004484 0,000056];  
% Вектор коефіцієнтів характеристичного рівняння  
>> r = roots(n)  
% Застосування кореневої функції для обчислення коренів  
r =  
0.9996  
0.8953  
0,0024 + 0.0075i  
0,0024 - 0.0075i
```

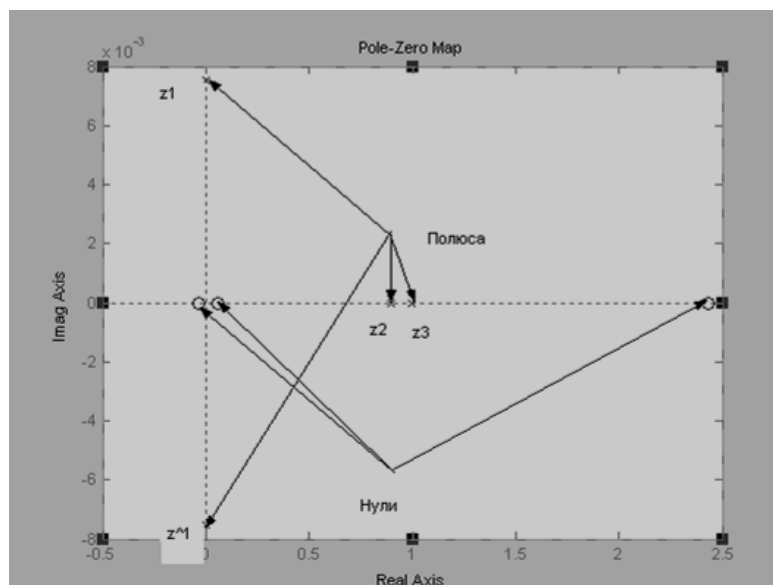
**Рис. 22. Програма реалізації побудови коренів характеристичного рівняння**

*Джерело: сформовано на основі [15].*

Очевидно, що всі корені мають позитивну реальну частину, тому всі вони лежать в правій половині *Z*-площини. Це свідчить про те, що система, яка описує інвестиційний процес, є нестійкою.

Пакет *MATLAB* також дозволяє визначити розташування полюсів і нулів функції передачі. На (Рис. 23) зображено полюси і нулі функції передачі. Використовуючи модель, можна порівняти результати, отримані

шляхом аналізу стійкості системи, що описує інвестиційний процес за різними критеріями.

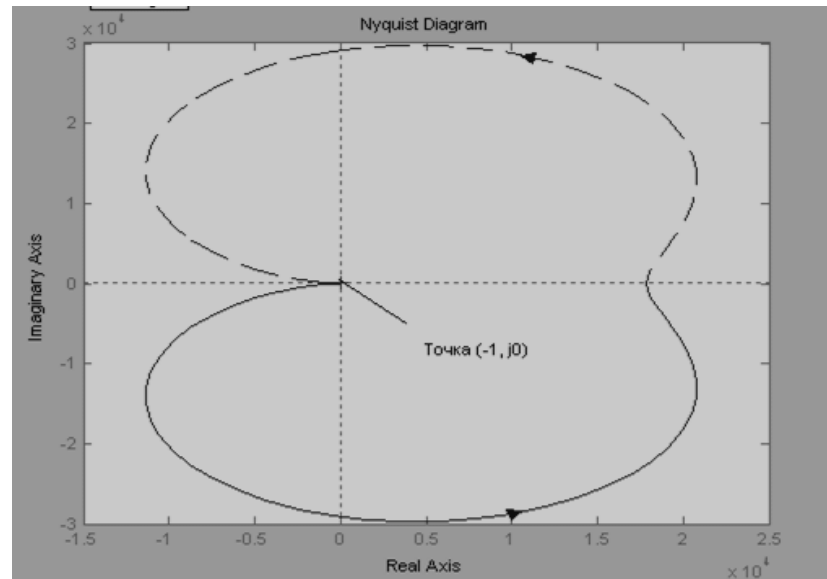


**Рис. 23. Розташування полюсів і нулів функції**

*Джерело: сформовано на основі [16].*

Для констатації стійкості відкритої системи за критерієм Найквіста необхідно, щоб схема не охоплювала точку  $(-1, j0)$ . На (рис. 24) наведено Годограф Найквіста для досліджуваної системи управління інвестиційними процесами стартап-проектів. Аналіз діаграму, підтверджує також гіпотезу, що система є нестабільною, оскільки її годограф охоплює точку  $(-1, j0)$  при русі проти годинникової стрілки. Якщо оцінювати додатково відносну волатильність, можна стверджувати, що система досить нестабільна, хоча певні коригувальні дії можуть привести її до стабільного стану.

Аналіз стійкості інвестиційних процесів стартап-проектів, особливо у контексті інновацій, використовуючи критерії Найквіста, Михайлова та Рауса-Гурвіца, відіграє ключову роль у підвищенні ефективності управління такими проектами. Застосування пропонованих методів дозволяє керівникам проектів не тільки оцінити потенційну стійкість інвестиційних проектів, але й виявити потенційні ризики та волатильність, що є особливо актуальним у динамічному і непередбачуваному світі стартапів.



**Рис. 24. Схема Найквіста для системи управління інвестиційними проєктами**

*Джерело: сформовано на основі [16].*

Для інвесторів це знання є вирішальним, адже інвестування у стартапи містить у собі високий рівень ризику, але й потенціал для значного прибутку. Передбачення стійкості проєкту дозволяє інвесторам зробити більш обґрунтовані рішення, зменшуючи ризики і збільшуючи шанси на успіх інвестиції. Для засновників стартапів, у свою чергу, глибоке розуміння стійкості свого проєкту є фундаментальним для підтримки стабільного розвитку і зростання. Аналіз стійкості дає можливість виявити слабкі місця в управлінні проєктом і вчасно адаптувати стратегію для подолання потенційних проблем, тим самим збільшуючи вірогідність успіху стартапу в широкому глобальному сенсі. Використання аналізу стійкості систем та процесів, заснованого на побудові трансферної функції інвестиційного стартап-проєкту, є значним внеском у стратегічне планування та управління ризиками, яке дозволяє як інвесторам, так і засновникам стартапів заздалегідь мінімізувати негативні наслідки збурень і забезпечити стабільний розвиток проєктів.

## **ВИСНОВКИ**

Розроблений комплексний підхід до аналізу стійкості інвестиційних проєктів дозволяє підвищити ефективність управління ризиками та прийняття інвестиційних рішень в умовах високої невизначеності. Застосування методів теорії автоматичного управління для аналізу економічних систем відкриває нові можливості для моделювання та прогнозування поведінки інвестиційних проєктів. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розширення моделі з урахуванням більшої кількості факторів, розробку адаптивних механізмів управління стійкістю проєктів та створення програмного забезпечення для автоматизації процесу аналізу стійкості інвестиційних проєктів.

## **Література:**

1. Statista. Розподіл стартапів у Європі за джерелом фінансування. URL: <https://www.statista.com/statistics/1072995/distribution-of-startups-europe-by-financing-source/> (дата звернення: 23.02.2024).
2. Exploding Topics. Статистика невдач стартапів. URL: <https://explodingtopics.com/blog/startup-failure-stats> (дата звернення: 21.02.2024).
3. Forbes. Венчурний капітал не є реальністю фінансування для більшості стартапів. Ось що є. URL: <https://www.forbes.com/sites/hollyeve/2020/07/06/venture-capital-is-not-the-funding-reality-of-most-startups-heres-what-is/?sh=1662af2465ea> (дата звернення: 25.02.2024).
4. Герц Д.Б. Аналіз ризиків у капітальних інвестиціях. Harvard Business Review. 1979. Вересень. URL: <https://hbr.org/1979/09/risk-analysis-in-capital-investment> (дата звернення: 21.07.2024).
5. Малиновська Ю., Орицин Н., Парацин О., Хомяк Я. Моделювання інноваційно-інвестиційних стратегій підприємства. Інвестиції: практика та

досвід. 2023. № 22. С. 112-117. DOI: <https://doi.org/10.32702/2306-6814.2023.22.112>

6. Мазур Д., Мазур А., Мазур Г., Ковбі А. Фінансове моделювання як інструмент вирішення основних проблем підприємства. Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки. 2023. № 2(316). С. 175-178. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2023-316-2-28>

7. Юхименко Г.К., Лазаренко І.С. Моделювання інвестиційного фонду акцій із застосуванням стратегій управління фінансовими деривативами та хеджування. Економічний вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". 2022. № 24. С. 175-178. DOI: <https://doi.org/10.20535/2307-5651.24.2022.274836>

8. Олешко Т., Попік Н., Турченко Д. Процес моделювання фінансових інвестиційних ризиків. Економіка та суспільство. 2023. № 56. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-56-111>

9. Лисенко О.І., Алексеєва І.В. Дослідження операцій. Конспект лекцій. Київ: НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", 2016. 196 с.

10. Раєвнева О., Бровко О., Руй С. Комп'ютерно-математичне моделювання впливу макросередовища на економічну поведінку підприємства. Праці 7-го Міжнародного симпозіуму з мультидисциплінарних досліджень та інноваційних технологій (ISMSIT). Анкара, Туреччина, 2023. С. 1-6.

11. Воропай Н.Л., Герасименко Т.В., Кирилова Л.О. та ін. Економіко-математичні методи та моделі: підручник. Одеса: ОНЕУ, 2018. 404 с.

12. Козак Ю.Г., Мацкул В.М. Математичні методи та моделі для магістрів з економіки. Практичні застосування: навчальний посібник. 2017. 254 с.

13. Перельмутер В. Електротехнічні системи: моделювання з Simulink® та SimPowerSystems™. CRC Press, 2020. ISBN 9781466514034.

14. Ікбал А., Моїноддін С., Редді Б.П. Основи електричних машин з числовим моделюванням за допомогою MATLAB / SIMULINK. John Wiley & Sons, 2021. ISBN 9781119682660.

15. Козбур І.Р., Козбур Г.В., Михайлишин Р.І. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни "Комп'ютерні методи дослідження систем автоматичного керування". Тернопіль: ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2019.

16. Манько Г.І. Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни "Сучасні проблеми автоматизованого керування" для студентів спеціальності 8.05020201 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології. Частина 1. Дніпро: УДХТУ, 2015.

### References

1. Statista (2020), "Distribution of Startups in Europe by Financing Source", available at: <https://www.statista.com/statistics/1072995/distribution-of-startups-europe-by-financing-source/>, (Accessed 23 February 2024).

2. Exploding Topics (2023), "Startup Failure Stats", available at: <https://explodingtopics.com/blog/startup-failure-stats>, (Accessed 21 February 2024).

3. Forbes (2020), "Venture Capital Is Not The Funding Reality Of Most Startups. Here's What Is.", available at: <https://www.forbes.com/sites/hollyeve/2020/07/06/venture-capital-is-not-the-funding-reality-of-most-startups-heres-what-is/?sh=1662af2465ea>, (Accessed 25 February 2024).

4. Hertz, D.B. (1979), "Risk Analysis in Capital Investment", Harvard Business Review, September 1979, available at: <https://hbr.org/1979/09/risk-analysis-in-capital-investment>, (Accessed 21 July 2024).

5. Malynovska, Y., Oryshchyn, N., Parashchyn, O., & Khomiak, Ya. (2024), "Modelling of innovation and investment strategies of the enterprise",

Investytsii: praktyka ta dosvid, vol. 22, pp. 112-117. DOI: <https://doi.org/10.32702/2306-6814.2023.22.112>

6. Mazur, D., Mazur, A., Mazur, G., & Cowby, A. (2023), “Financial Modelling as a Tool for Solving the Main Problems of the Enterprise”, Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences, (316)(2), 175-178. <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2023-316-2-28>

7. Yukhimenko, G.K., & Lazarenko, I.S. (2022), “Modelling of the Investment Fund of Shares with the Application of Financial Derivatives Management Strategies and Hedging”, Economic Bulletin of the National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, (24), 175-178. <https://doi.org/10.20535/2307-5651.24.2022.274836>

8. Oleshko, T., Popik, N., & Turchenyuk, D. (2023), “The Process of Modelling Financial Investment Risks”, Economy and Society, (56). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-56-111>

9. Lysenko, O. I., & Alekseyeva, I. V. (2016), *Doslidzhennia operatsij. Konspekt lektsij* [Operations Research. Lecture Notes], National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.

10. O. Rayevnyeva, O. Brovko, & S. Rui. (2023), “Computer-Mathematical Modeling of the Influence of the Macro-Environment on the Economic Behavior of the Enterprise”, Proceedings of 7<sup>th</sup> International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), Ankara, Turkiye, pp. 1-6

11. Voropai, N. L., Gerasimenko, T. V. and Kirylova, L. O. (2018), *Ekonomiko-matematychni metody ta modeli* [Economic-Mathematical Methods and Models], Odessa National Economic University, Odessa, Ukraine.

12. Kozak, Y. G., & Matskul, V. M. (2017), *Matematychni metody ta modeli dlia mahistriv z ekonomiky. Praktychni zastosuvannia* [Mathematical Methods and Models for Masters in Economics. Practical Applications], Tsentr uchbovoi literatury, Kyiv, Ukraine.

13. Perelmuter, V. (2020). *Electrotechnical Systems: Simulation with Simulink® and SimPowerSystems™*, CRC Press, Boca Raton, USA.

14. Iqbal, A. Moinoddin, S. & Reddy, B. P. (2021). *Electrical Machine Fundamentals with Numerical Simulation using MATLAB / SIMULINK*, John Wiley & Sons, Hoboken, USA.

15. Kozbur, I. R., Kozbur, G. V., & Mikhaylyshyn, R. I. (2019), *Metodychni vказivky do vykonannia laboratornykh robit z dystsypliny "Komp'uterni metody doslidzhennia system avtomatychnoho keruvannia"* [Methodological Guidelines for Performing Laboratory Works on the Discipline "Computer Methods of Researching Automatic Control Systems."], Ternopil National Technical University named after Ivan Pulyui, Ternopil, Ukraine.

16. Manko, G. I. (2015), *Metodychni vказivky do praktychnykh zaniat' z dystsypliny "Suchasni problemy avtomatyzovanoho keruvannia" dlia studentiv spetsial'nosti 8.05020201 - Avtomatyzatsiia ta komp'uterno-intehrovani tekhnolohii* [Methodological Guidelines for Practical Classes on the Discipline "Modern Problems of Automated Control" for students of specialty 8.05020201 - Automation and Computer-Integrated Technologies], vol. 1, Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine.

*Стаття надійшла до редакції 26.07.2024 р.*