

**Никифоров А. О.,
Антощенко Р. В.,
Галич І. В.,
Кісь В. М.,
Марченко М. В.,
Кісь-Коркіщенко Л. В.**
Державний
біотехнологічний
університет,
м. Харків, Україна
E-mail:
toninikiforov89@gmail.com

**ПОКАЗНИК ЯКОСТІ
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ
ЛОГІСТИКИ АГРОПРОМИСЛОВОГО
КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ПОРІВНЯЛЬНОЇ
ОЦІНКИ АЛЬТЕРНАТИВ
ІННОВАЦІЙНОГО РОЗВИТКУ**

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-27-47>

УДК 620.9:658.7:631:005.6

Никифоров А.О., Антощенко Р.В., Галич І. В., Кісь В.М., Марченко М.В., Кісь-Коркіщенко Л.В. Показник якості енергоефективності системи логістики агропромислового комплексу для порівняльної оцінки альтернатив інноваційного розвитку

Анотація. Розробка методичного апарату щодо оцінки якості та кількісного порівняння альтернативних інновацій у розвиток агропромислового комплексу (АПК) України, особливо системи логістики, є актуальним науковим завданням. Побудова системи ключових показників ефективності в даній області, їх впровадження у систему стандартів АПК дасть чіткі орієнтири для підприємств та дозволить здійснювати керування розвитком сільськогосподарської галузі з боку держави. В статті, на базі сутності L^8T^4 таблиці Бартіні, запропонований показник транспортної послуги для системи навантаження (розвантаження) суден-контейнеровозів у порту, а також – виведений коефіцієнт енергетичної ефективності даної логістичної операції. Наведений приклад чисельного розрахунку для конкретного морського порту.

Ключові слова: таблиця Бартіні, просторово-часові величини, розмірність, транспортна послуга, перенесення енергії, енергоефективність.

Nykyforov A.O., Antoshchenkov R.V., Halych I.V., Kis V.M. Marchenko M.V., Kis-Korkishchenko L.V. Quality indicator of energy efficiency of the logistics system of the agro-industrial complex for comparative assessment of innovative development alternatives

Abstract. The development of a methodological apparatus for the assessment and quantitative comparison of alternative innovations in the development of the agro-industrial complex (AIC) of Ukraine, especially the logistics system, is an urgent scientific task. The construction of a system of key performance indicators in this area, their implementation in the system of AIC standards will provide clear guidelines for enterprises and will allow the state to manage the development of the agricultural sector. In the article, based on the essence of the $L8T^4$ Bartini table, a transport service indicator is proposed for the system of loading (unloading) of container ships in the port, and the energy efficiency coefficient of this logistics operation is derived. An example of a numerical calculation for a specific seaport is given.

Key words: Bartini table, space-time quantities, dimension, transport service, energy transfer, energy efficiency.

Актуальність проблеми

Агропромисловий комплекс (АПК) України є однією з ключових галузей національної економіки, яка має значний потенціал для забезпечення як внутрішнього попиту, так і експорту на світові ринки. Одним із найбільш ефективних інструментів для забезпечення стійкого розвитку АПК є впровадження інноваційних стратегій, які здатні підвищити ефективність виробничих процесів, оптимізувати використання ресурсів та підвищити якість продукції [1], [2]. Проте, незважаючи на наявність широких можливостей для впровадження інновацій, питання щодо оцінки їхньої ефективності залишається малодослідженим і недостатньо впровадженим на практиці. Багато підприємств АПК стикаються з труднощами у визначенні реальної віддачі від інноваційних впроваджень, що обмежує їхнє бажання інвестувати в новітні технології та процеси. Невизначеність щодо результативності інноваційних заходів ускладнює планування розвитку та прийняття стратегічних рішень. Окрім цього, глобальні ринки вимагають від аграрних підприємств України адаптації до нових умов, зокрема до посилення екологічних стандартів, цифровізації та автоматизації виробничих процесів. В таких умовах постає необхідність не лише у впровадженні інновацій, але й у розробці чітких моделей та стандартів аналізу їхньої ефективності.

В багатьом створення таких стандартів полягає у розробці інформаційного переліку ключових параметрів ефективності (КРІ: Key Performance Indicators) [3]. Система КРІ має характеризувати стан справ підприємства та сприяти прийняттю ефективних рішень щодо її розвитку шляхом порівняння відповідних ключових показників: із середньостатистичними показниками в галузі; з абсолютними стандартами; з власними результатами динамічного розвитку (дані за звітний період).

В [4] розкривається сутність і особливості метрик КРІ щодо державної підтримки малого підприємництва в аграрному секторі економіки в сучасних умовах. Обґрунтовано, що комплекс показників досягнення цілей державної підтримки відображається в матриці показників.

В [5] - [9] вказується на те, що найбільш вагомим чинником при інноваціях у розвиток АПК, є напрямок розвитку та трансформування логістики, зокрема логістики виробництва та транспортування зернових та олійних культур.

В [10] пропонується підхід з автоматизації процесів управління транспортування пшениці на підставі розв'язання оптимізаційних дворівневих транспортних задач, де використовуються розроблені логістичні метрики КРІ. Але запропонована система метрик не є достатньо інформаційною для логістичної системи АПК України. Запропоновані показники охоплюють лише процеси доставки до морських портів та проміжної перевалки пшениці.

Найбільш інформаційним чинником, що охоплює більшість аспектів будь якого процесу, є його характеристика з боку витрат енергії, потужності, створеної роботи [11]. Оцінка енергоемності процесів перевезення і транспортно-логістичного обслуговування – це актуальна наукова задача. Її актуальність зростає із зростанням швидкостей переміщення, масштабів перевезень, зростаючим охопленням зон обслуговування, освоєнням нових типів транспортних засобів, енергоустановок та видів палива.

На цей час, у світлі розвитку тривимірної складської та розподільчої логістики (висотні склади-термінали, океанські контейнеровози, обслуговування хмарочосів тощо) необхідний розвиток оптимізаційного моделювання тривимірних мереж та полів.

Перелічені аспекти вимагають розвитку методів оцінки енергоефективності технічних систем з погляду вимог майбутнього технологічного укладу. Нові методи оцінки енергоефективності можуть бути побудовані на підставі сутностей таблиці Бартіні або – системи просторово-часових величин, [11]: $L^m T^r$, де L – міра відстані (лінійного розміру); T – міра часу, m , r – значення показників ступеня. Являючись

таблицею розмірності інваріант законів природи (соціальних та економічних у тому числі), LT-таблиця надає можливість отримати універсальні та інформаційні показники, що забезпечуватиме багатоаспектну порівняльну оцінку інновацій у розвиток логістики.

Формулювання мети дослідження

Мета роботи – аналіз сутностей LT-таблиці, що характеризують закон збереження потужності, розробка показника енергетичної ефективності системи логістики АПК з метою порівняльної оцінки інновацій.

Результати досліджень

1 Система просторово-часових величин Бартіні та її використання при розробленні нових концептуальних засад чисельної оцінки процесів

LT-таблиця являє собою безліч вертикальних стовпців, що подається як ряд цілісних ступенів довжини, і безліч горизонтальних рядків – цілісних ступенів часу (табл. 1). Перетинання кожного стовбця і кожного рядку автоматично дає розмірність той чи іншої величини. Базою або опорною точкою таблиці можна вважати поле, де перетинається стовбець L^0 і рядок T^0 . Це сукупність всіх безрозмірних фізичних констант (наприклад – кут, який виражений у радіанах).

Ідея методу переведення вимірювань фізичних величин у просторово-часової метриці належить Дж. Максвеллу. В 1873 році, в своєму трактаті «Електрика і магнетизм», він встановив, що розмірність маси – є m^3/c^2 , а також, що для створення системи вимірювань достатньо двох основних одиниць вимірювання: L – довжини, та T – часу (метр, секунда).

LT-розмірність для маси може бути виведеною з виразу для вимірювання маси Сонця на підставі третього закону Кеплера [12]:

$$\frac{4\pi^2 R^3}{\gamma T^2} = M_H, \quad (1)$$

де $R, [м]$ - відстань між центром планети та центром Сонця;

$T, [с]$ - період обертання планети навколо Сонця;

$\gamma = 6,67430(15) \cdot 10^{-11} \frac{м^3}{с^2 \cdot кг}$ - гравітаційна постійна Кевендіша [13];

$M_H, [кг]$ - маса Сонця.

Виходячи з (1)

$$M_H \propto \frac{R^3}{T^2} = \frac{R_2^3}{T_2^2} = \dots = \frac{R_i^3}{T_i^2} = \text{const}, \quad (2)$$

де R_i, T_i - радіус орбіти і період обертання для i -ої планети.

З цього, можна стверджувати, що величина вимірювання маси, що виражена в кілограмах, є пропорційною її величині, що виражена у m^3/c^2 .

Якщо, повертаючись до табл. 1, рухатися від її базового поля по горизонталі вправо, ми отримаємо всі чисто геометричні величини: довжину; площу; об'єм; переміщення об'єму вздовж прямої; переміщення об'єму на анізотропній площині; переміщення об'єму у анізотропному просторі. Переміщення ліворуч дає розподіл відповідних безрозмірних величин на одиницю довжини, площі та об'єму. Найпростіший приклад $L^{-1}T^0$: змінення куту повороту на одиницю довжини – кривизна.

Більш складне з'ясувати зміст величин у полях таблиці, якщо рухатися вертикально, вздовж будь-якого стовпця. Для стовпця L^0 , рухаючись вгору від базового поля, спочатку отримаємо частоту – змінення безрозмірної величини за одиницю часу.

Наприклад, це може бути кутова швидкість: змінення за часом кута повороту, який виражений у радіанах. Наступне поле – зміна змінення безрозмірної величини за одиницю часу. Для руху обертання це є кутове прискорення. Ще далі – змінення кутового прискорення. Переміщення вниз від опорного поля дає «часову довжину» - час, протягом якого відбувається то чи інше змінення безрозмірної величини. Для коливального або обертального руху це є період.

Таблиця 1

Система просторово-часових величин Бартіні

T ^r	L ^m									
	L ⁻³	L ⁻²	L ⁻¹	L ⁰	L ¹	L ²	L ³	L ⁴	L ⁵	L ⁶
T ⁶							L ³ ·T ⁻⁶	L ⁴ ·T ⁻⁶	Змінення потужності	Швидк. передачі потужн.
T ⁵						Змінення тиску	Поверхностна потужн.	Швидк. змінення сили	Потужність	Швидк. передачі енергії
T ⁴					Змінення щільн. току	Тиск	Кутове прискор. маси	Сила	Момент сили. Енергія	Швидк. передачі дії
T ³				Змінення куто-вого приск.	Щільн. току	Напруж. ел.-маг. поля. Градієнт	Струм. Масовий розхід	Швидк. переміщ. заряду. Імпульс	Момент кільк. руху. Дія	Момент дії
T ²			Змінення об'ємн. щільн.	Масова щільн. Кут. приск.	Прискорення	Різн. потенц.	Маса. Кільк. електрич-ва	Магнітн. момент	Момент інерції	
T ¹		L ⁻² ·T ⁻¹	L ⁻¹ ·T ⁻¹	Частота	Швидкість	Обільність 2-мірна	Розхід об'ємний	Швидк. переміщ. об'єму		
T ⁰	L ⁻³ ·T ⁰	L ⁻² ·T ⁰	Змінення провідності	Безрозм. константи	Довжина Ємність Самоіндукц.	Поверхня	Об'єм просторовий			
T ¹	L ⁻³ ·T ¹	Змінення магн. проникненості	Провідність	Період	Тривалість відстані	L ² ·T ¹				
T ²	L ⁻³ ·T ²	Магн. проникненість	L ⁻¹ ·T ²	Поверхня часу	L ¹ ·T ²					
T ³	L ⁻³ ·T ³	L ⁻² ·T ³	L ⁻¹ ·T ³	Об'єм часу						

Таким чином, суть змін, що відбуваються при переміщенні у LT-таблиці наступне: якщо рухатися по вертикалі вгору – це еквівалентно зміненню величини на одиницю часу; якщо рухатися по горизонталі вправо – переносу величини на одиницю довжини. Переміщення по діагоналі вправо і вгору еквівалентно множенню вихідної величини на лінійну швидкість.

Поля LT-таблиці характеризують відповідні відомі та ще невідомі об'єктивні закони руху матерії, де просторово-часова розмірність, яка є у даному полі таблиці, є розмірністю інваріанти відповідного закону. Отже поле L²T⁻⁴ характеризує закон Гука або сталість (інваріант) модуля пружності. Поле L¹T⁻² – закон коливального руху маятника або сталість прискорення вільного падіння. L³T⁻² – перший закон Кеплера або сталість маси в планетарному русі.

Найбільш цікавими є поля LT-таблиці, що складають діагональ, яка проходить через базове поле L⁰T⁰ та розповсюджується зліва направо вгору. Ці поля характеризують закони збереження. Так, поле L⁵T⁻⁵ представляє закон збереження

енергії або сталості потужності при існуванні сталого поля. Поле L^6T^{-6} – закон збереження мобільності або сталості швидкості перенесення потужності [11].

Поле L^6T^{-6} , на відміну від полів з меншими ступенями ЛТ-параметрів, характеризує вже не тільки фізичні закони, але й процеси в економічних системах. Це можна проілюструвати на прикладі процесу застосування екскаватору. Його функціонування під час роботи характеризується деякою потужністю. Однак, ця потужність може бути застосованою лише у випадку доставки екскаватора до місця виконання робіт. Для його доставки потрібна інша потужність – на транспортування залізничною або автомобільною платформою. Мобільність наявного парку екскаваторів є постійна величина. З цього, при плануванні робіт терміни мають визначитися таким чином, щоб потрібна мобільність не перебільшувала наявну мобільність.

Використовуючи ЛТ-таблицю, можна будувати комплексні показники ефективності для різноманітних систем. Такі показники, будучи створеними на підставі розмірності, що враховує об'єктивні закони функціонування, надаватиме більш інформаційну та повну порівняльну оцінку альтернатив.

Наприклад, при оцінці ефективності транспортних систем широко використовується показник, що обчислюється як добуток маси вантажів на відстань їх перевезення. Цей показник вимірюється у тонно-кілометрах. Якщо подавати цей показник у ЛТ-метриці, то його розмірність буде:

$$M \cdot R: (L^3T^{-2}) \cdot L = L^4T^{-2}, \quad (3)$$

де M - маса вантажів, що перевозяться;
 R - відстань, на яку перевозяться вантажі.

З показника (3) виводиться продуктивність транспорту за встановлений період часу:

$$\frac{M \cdot R}{\Delta t} = M \cdot V: \frac{(L^3T^{-2}) \cdot L}{T} = L^4T^{-3}, \quad (4)$$

де Δt - період часу, за якої оцінюється продуктивність транспорту;
 V - швидкість транспортування.

Як видно з (4), тут неявно вважається, що якщо збільшити масу вантажу у 2 рази, то швидкість транспортного засобу має зменшитися також у 2 рази при той самій потужності. В дійсності цього не відбувається – швидкість при постійній потужності зменшується всього у $2^{1/3}$ або у 1,26 разів. Причина виникнення такої помилки – некоректність вибору показника для оцінки транспортних послуг.

Змінемо концепцію транспортної послуги від транспортування на визначену відстань маси вантажу (тонно-кілометри), на концепцію перенесення енергії, оскільки будь який вантаж у економічній системі більш інформаційно вимірюється не його фізичною масою, а кількістю енергії, що витрачається на його переміщення. Тоді, замість (3), слід записати:

$$E \cdot R \propto M \cdot V^2 \cdot R: \frac{(L^3T^{-2}) \cdot L^2}{T^2} \cdot L = L^6T^{-4}, [T \cdot \text{км} \cdot (\text{км}/\text{г})^2], \quad (5)$$

де E - енергія (кількість роботи), яку необхідно витратити на транспортування вантажу на одиницю відстані.

Показник (5), який отримав назву – «тран», дозволяє оцінювати транспортні послуги не тільки за обсягом вантажів та відстанню їх транспортування, але ще за швидкістю доставки. Тобто оплата праці, наприклад, в залізничному транспорті, спираючись на тонно-кілометри не враховує швидкості (своєчасності) доставки. Але

застосовуючи трани, ми приходимо до системи стимулювання, яка вимагає точного виконання графіку руху поїздів.

Наведені міркування стосуються лише процесів, що описують рух матеріальних точок, що мають масу. Якщо ввести у розгляд об'єкти, що враховують уявлення про гравітаційне поле, динаміку твердих, рідких та газоподібних тіл, електромагнітні, світлові і теплові процеси, можна побудувати більш інформативні і складні показники оцінки якості функціонування АПК, взагалі, та його транспортної системи, зокрема.

2 Використання сутності L^8T^4 таблиці Бартіні для оцінки енергоефективності транспортно-складського обслуговування 3D просторових об'єктів

Показник з оцінки транспортних послуг (5) базується на сутності L^6T^4 , яка передбачає лінійну (одномірну або мережну) модель транспортування. Однак, у світі розвитку тримірної складської інфраструктури та розподільної логістики (висотні склади-термінали, океанські контейнеровози, функціонування логістичних систем у хмарочосах тощо), необхідно розвивати оптимізаційне моделювання 3D просторових об'єктів в системах логістики.

Це потребує розвитку методів оцінки енергоефективності технічних систем з точки зору майбутнього технічного укладу. Сутність L^6T^4 , $[\text{кг}\cdot\text{м}\cdot(\text{м}/\text{с})^2]$ дозволяє здійснювати порівняльну оцінку інновацій в систему логістики при використанні її лінійної або мережевої моделі (транспортування по ребрам мережі).

При спробі оцінки інноваційних альтернатив, де розглядається ареальний (2D) або об'ємний (3D) характер розповсюдження продукції (наслідків виробництва) та (або) матеріальних і людських ресурсів, необхідно застосовувати показники з розмірністю: $[\text{кг}\cdot\text{м}^2\cdot(\text{м}/\text{с})^2]$ (L^7T^4) або $[\text{кг}\cdot\text{м}^3\cdot(\text{м}/\text{с})^2]$ (L^8T^4), відповідно.

Прикладами з 2D-об'єктами (процесами) можуть служити: процес розповсюдження відпрацьованих газів по території населеного пункту; обслуговування приміським транспортом маятникової міграції населення в агломерації; внесення посівів та добрив на сільськогосподарські поля. 3D-об'єкти присутні при: розповсюдженні відпрацьованих газів у об'ємі повітря над містом; відсіпці вугілля у відкритих терміналах; розподілення робітників у робочих приміщеннях хмарочосів; завантаження простору вантажного відсіку вантажного судна; завантаження простору судна-контейнеровозу.

Розглянемо приклад оціночного розрахунку енергоефективності транспортної послуги по заповненню об'єму океанського контейнеровоза портовими кранами.

Сучасне судно-контейнеровоз завантажується у порту після швартування його до причалу і підключення до портової системи електроживлення. Повний процес завантаження містить: доставлення контейнерів з автомобільного (залізничного) фронту, з внутрішніх і тилових контейнерних складів (майданчиків); підвезення контейнерів під крани-контейнери; безпосереднє завантаження кранами відсіків трюму і палуби; завантаження паливом, водою та іншими засобами. Відповідні енергозатрати забезпечуються портом і вони фіксуються. Наприклад, порт Лос-Анджелеса з річною продуктивністю 10^6 TEU (Twenty-foot Equivalent Unit: умовна контейнерна одиниця у вигляді двадцяти-футового морського контейнеру) витрачає 20 000 МВт·г електричної енергії [14]. З цього об'єму енерговитрат на роботу причальних кранів-понтейнерів витрачається 26% енергії.

Розрахунковий приклад буде охоплювати лише процес безпосереднього завантаження судна-контейнеровоза контейнерами групою кранів-контейнерів. За результатами розрахунку буде оцінено енергоефективність групи кранів як єдиного пристрою, що здійснює роботу щодо заповнення об'єму вантажного простору судна-

контейнеровоза. Для прикладу в якості судна-контейнеровозу розглянемо контейнеровоз класу Triple-E – OOCL Honk Kong. Контейнерна ємність судна складає 21 413 TEU. Звідси кубатура вантажомісткості даного контейнеровоза буде:

$$W = N_{\text{TEU}} \cdot U1_{\text{TEU}} = 21\,413 \text{ TEU} \cdot 39 \frac{\text{м}^3}{\text{TEU}} = 835\,000 \text{ м}^3, \quad (6)$$

де N_{TEU} - контейнерна ємність судна, виміряна у двадцяти-футових морських контейнерах;

$U1_{\text{TEU}}$ - об'єм одного двадцяти-футового контейнеру.

З цього, транспортна робота групи кранів щодо заповнення кубатури (6) дорівнює

$$M \cdot W = 63\,279\,000 \text{ кг} \cdot 835\,000 \text{ м}^3 = 52\,838 \cdot 10^9 \text{ кг} \cdot \text{м}^3, \quad (7)$$

де $M = 63\,279\,000 \text{ кг}$ - вантажопідйомність контейнеровозу (максимальна маса вантажу).

Далі обчислимо значення транспортної послуги $M \cdot W \cdot V^2$, $[\text{кг} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2]$, де V , $[\text{м}/\text{с}]$ - середня швидкість вантажопотоку. Відомо, що для портових кранів швидкість переміщення вантажу складає 150 – 175 м/хв. (під'їм, спускання), переміщення крану по рельсах – до 152 м/хв. Якщо перейти до системи СІ та взяти середнє округлене значення швидкості, отримаємо швидкість вантажопотоку, що забезпечується одним краном-контейнером $V1 \approx 2$, $[\text{м}/\text{с}]$.

Оскільки розглядається не один кран, а їх група, де крани працюють паралельно, то швидкість вантажопотоку має збільшуватися пропорційно кількості кранів. Для розрахунку приймемо, що у групі одночасно працює 6 кранів. Тоді:

$$V = V1 \cdot n = 2 \cdot 6 = 12 \text{ м}/\text{с}, \quad (8)$$

де $n = 6$ - кількість кранів-контейнерів в групі.

Для такої швидкості вантажопотоку транспортна послуга буде:

$$\begin{aligned} M \cdot W \cdot V^2 &= 52\,838 \cdot 10^9 \text{ кг} \cdot \text{м}^3 \cdot (12 \text{ м}/\text{с})^2 = \\ &= 7,609 \cdot 10^{15} \text{ кг} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2 = 7,609 \cdot 10^{15} \text{ м}^8 \cdot \text{с}^{-4}. \end{aligned} \quad (9)$$

Розмірність транспортної послуги (9) можна подати, як:

$$\text{м}^8 \cdot \text{с}^{-4} = \frac{\text{м}^3}{\text{с}^2} \cdot \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} \cdot \text{м}^3 = \text{Дж} \cdot \text{м}^3. \quad (10)$$

Тобто транспортна послуга (9) це є перенесення енергії у визначений об'єм (вантажний об'єм контейнеровозу).

Далі, маючи на увазі, що транспортна послуга (9) вимірюється як $\text{Дж} \cdot \text{м}^3$, а також, що це характеризує корисний вихід з витрат енергії, оцінимо енергоефективність розрахованої транспортної послуги при завантаженні трюму та палуби контейнеровозу шістьма кранами-контейнерами у порту Лос-Анджелеса. Для обчислення безрозмірного коефіцієнту енергоефективності поділимо корисні енерговитрати з заповнення вантажного об'єму (транспортну послугу (9)) на енерговитрати на функціонування кранів-контейнерів, які приведені до визначеного вантажного об'єму судна-контейнеровозу:

$$k_{\text{D3}}^{\text{ен.еф.}} = \frac{M \cdot W \cdot V^2}{E \cdot W}, \quad (11)$$

де $M \cdot W \cdot V^2$, $[\text{Дж} \cdot \text{м}^3]$ - транспортна послуга (9);

E , $[\text{Дж}]$ - енерговитрати на роботу групи кранів-контейнерів;

$W, [M^3]$ - вантажний об'єм контейнеровозу.

Статистична оцінка річної норми на відпрацювання 10^6 умовних одиниць TEU в порту складає 20 000 МВт·г електричної енергії [14]. З цього, енерговитрати на заповнення трюму та палуби визначеного контейнеровозу складатиме:

$$E^{\text{порт}} = 20000 \text{ МВт} \cdot \varepsilon \cdot \frac{N_{\text{TEU}}}{N_{\Sigma \text{TEU}}} = 20000 \text{ МВт} \cdot \varepsilon \cdot \frac{21413 \text{ TEU}}{10^6 \text{ TEU}} = 428 \text{ МВт} \cdot \varepsilon = 1,542 \cdot 10^{12} \text{ Дж}, \quad (12)$$

де E - портові енерговитрати на завантаженні трюму і палуби визначеного контейнеровозу;

$N_{\text{TEU}} = 21413 \text{ TEU}$ - ємність вантажності відсіків та палуби контейнеровозу класу Triple-E – OOCL Honk Kong;

$N_{\Sigma \text{TEU}} = 10^6 \text{ TEU}$ - річний оборот порту Лос-Анджелес у TEU.

Якщо частка енерговитрат в порту на роботу причальних кранів складає 26 % [14], тоді енерговитрати на роботу кранів при завантаженні контейнеровозу є:

$$E = E^{\text{порт}} \cdot 0,26 = 1,542 \cdot 10^{12} \cdot 0,26 = 0,4 \cdot 10^{12} \text{ Дж}. \quad (13)$$

З цього, оцінка транспортної послуги щодо завантаження контейнеровозу з точки зору використаної енергії буде:

$$E \cdot W = 0,4 \cdot 10^{12} \text{ Дж} \cdot 835000 \text{ м}^3 = 333 \cdot 10^{15} \text{ Дж} \cdot \text{м}^3. \quad (14)$$

Тоді, коефіцієнт енергоефективності транспортної послуги щодо завантаження трюму та палуби контейнеровозу класу Triple-E – OOCL Honk Kong при застосуванні групи з шести кранів-контейнерів, складає:

$$k_{\text{ДЗ}}^{\text{ен.еф.}} = \frac{M \cdot W \cdot V^2}{E \cdot W} \cdot 100\% = \frac{7 \cdot 609 \cdot 10^{15} \text{ Дж} \cdot \text{м}^3}{333 \cdot 10^{15} \text{ Дж} \cdot \text{м}^3} \cdot 100\% = 0,0228 \cdot 100\% \approx 2,3\%, \quad (15)$$

Отже, система вантажо-розвантажувальних засобів у порту має дуже низький коефіцієнт енергоефективності.

З практичного досвіду відомо, що навантажувальні (розвантажувальні) роботи завжди виявляються вузьким місцем у будь-якій системі логістики. Тому, інноваційний розвиток логістики АПК України, перш за все, має бути спрямований на розвиток таких систем та засобів. Впровадження нових концептуальних засад з транспортування сільськогосподарських товарів дозволить підвищити енергоефективність (собівартість) процесів збору, обробки та доставки до користувача агропромислової продукції.

3 Обговорення отриманих результатів

Можна помітити, що у (15) вантажний об'єм контейнеровозу, W , входить як у чисельник, так й у знаменник. На перший погляд операція множення на цю величину при обчисленні транспортної послуги (9) та величини (14) є зайвою. Це буде мати сенс, якщо прийняти, що розподіл енергії по об'єму у (14) і розподіл маси вантажу у трюмі та на палубі у (7) є ідентичними – рівномірними по елементах об'єму.

Однак при більш деталізованому підході ці обидва розподіли – відрізняються. Наприклад, розподіл енергії по об'єму є рівномірним, а розподіл маси вантажу здійснюється з урахуванням щільності вантажної маси. Знизу розміщуються більш важкі контейнеру, зверху – більш легкі або пусті. При такому підході, при розрахунку (7), потрібно буде ввести вагові коефіцієнти по рівнях трюмного простору.

В наведеному прикладі здійснено спрощення з метою зменшення інформації, що не впливає безпосередньо на демонстрування можливостей метода застосування LT-метрик.

Також, позбавлена гнучкості розрахункова заміна групи кранів-контейнерів єдиним гіпотетичним краном. Зміни у механіці і в електродинаміці такого крану відносно групи кранів не будуть пропорційними зміненню швидкості переміщення вантажу. Однак, для першого наближення таке припущення є можливим.

Аналізуючи аналітичний вираз для обчислення транспортної послуги (9), можна встановити головне протиріччя та, з цього, актуальний напрямок удосконалення сучасних навантажувальних (розвантажувальних) систем та засобів. Отже, у виразі (9) присутній квадрат швидкості вантажопотоку, маса вантажу та вантажний об'єм транспортного засобу. Найбільш перспективним напрямком збільшення оцінки транспортної послуги є напрямок збільшення швидкості вантажопотоку, оскільки у (9) входить квадрат даної величини. Для її збільшення можна запроваджувати, наприклад, інновації щодо: автоматизації процесів навантаження (розвантаження); пакетизації вантажів; розробки принципово нових навантажувально-розвантажувальних засобів та концепцій навантаження (розвантаження).

Висновки

1. Для порівняльного аналізу інновацій в системі логістики АПК найбільш придатні для використання такі сутності таблиці Бартіні, як: L^6T^{-4} , L^7T^{-4} і L^8T^{-4} , які характеризують, відповідно: лінійний, ареальний та об'ємний методи перенесення енергії. Такі показники дають найбільш інформативну та повну оцінку інноваційних альтернатив з точки зору врахування всіх системних процесів та взаємодій.

2. В статті використана сутність L^8T^{-4} , на основі якої побудована оцінка транспортної послуги для системи завантаження трюму і палуби судна-контейнеровозу групою кранів-контейнерів, а також виведений безрозмірний коефіцієнт енергетичної ефективності даної логістичної підсистеми.

3. Коефіцієнт енергетичної ефективності, який обчислений для операції завантаження трюму і палуби судна-контейнеровозу класу Triple-E – OOCL Honk Kong групою з шості кранів-контейнерів в порту Лос-Анджелеса, складає величину 2,3 %. Це свідчить про дуже низький рівень енергоефективності сучасних систем та засобів навантаження (розвантаження).

4. Виходячи з виразу для транспортної послуги (9), можна більш системно розглядати напрямки подальшого удосконалення сучасних систем та засобів навантаження (розвантаження). Найбільш перспективним напрямком є напрямок щодо підвищення швидкості вантажопотоку. Оскільки у (9) присутній квадрат швидкості, з цього такі інновації у розвиток логістики АПК будуть мати найбільшу віддачу у порівнянні з підвищенням вантажопідйомності та місткістю технічних засобів транспортування (маса та обсяг вантажного відсіку присутні в першому ступені).

Список використаних джерел

1. Людвік І. І. Підвищення конкурентоспроможності АПК України через інноваційні стратегії: розробка та застосування моделей аналізу ефективності в умовах глобалізації. *Журнал Економіка та суспільство*. № 68. 2024. С. 1 – 10. DOI: 10.32782/2524-0072/2024-68-79

2. Сегеда С. А., Хахула Б. В., Любар Р. П., Хатула Л. П., Ситник О. О. Інноваційна агропродовольча політика, як фактор забезпечення глобальної продовольчої безпеки. *Журнал Агроекономіка*. № 22. 2024. С. 51 – 57. DOI: 10.32702/2306-6792.2024.22.51

3. Цюцюра С.В., Криворучко, О.В., Цюцюра М.І. Ключові показники ефективності. Принципи розробки ключових показників для бюджетної сфери. *Журнал Управління розвитком складних систем*, Вип. 10. 2012. С. 87 – 91. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Urss_2012_10_17

4. Русанюк В.В. Метрики показників ефективності державної підтримки малого підприємництва в аграрному секторі. *Журнал Економіка АПК*, № 6. 2021. С. 117 – 127. DOI: 10.32317/2221-1055.202106117
5. Загірняк Д., Стефківська Ю. Аналіз напрямів оптимізації експорту й імпорту зернових та олійних культур в аспекті інституціоналізації АПК України. *Журнал Вісник КрНУ ім. М. Остроградського*. № 150 (1). 2025. С. 57 – 64. DOI: 10.32782/1995-0519.2025.1.7
6. Yanovska V., Król M., Pittman R. The logistics of grain exports from wartime Ukraine: What are the highest priority areas to Address? *Journal of Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. Vol. 30. March 2025. P. 1 – 13. DOI: 10.1016/j.trip.2025.101363
7. Sitnicki M.W., Kurinskyi D., Pimenowa O., Wasilewski M. and Wasilewska N. Strategic Formation of Agricultural Market Clusters in Ukraine: Emerging as a Global Player. *Journal of Sustainability*. No. 16 (21). July 2024. P. 1 – 21. DOI: 10.3390/su16219430
8. Zakharchuk O., Nechytailo V., Navrotskyi Ya., Kovalenko A. Development of grain logistics in Ukraine. *Journal of Ekonomika APK*. No. 32 (3). June 2025. P. 21 – 30. DOI: 10.32317/ekon.apk/3.2025.21
9. Рустамов Р.Ш. Оценка перспектив развития зерновой логистики в Украине. *Журнал Збірник наукових праць ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна*. № 8. 2014. С. 127 – 133. http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpdnu_tstp_2014_8_19
10. Москвіченко І.М., Стаднік В.Г., Павленко В.В. Щодо ефективності логістичних схем експорту українського зерна до країн-споживачів Азіатського регіону. *Журнал Науковий вісник УНУ*, № 36. 2021. С. 101 – 107. DOI: 10.32782/2413-9971/2021-36-18
11. Aleinikov A. G., Smarsh D. A. Viva Di Bartini: Eleven New Laws of Conservation Expanding Physics for Global Strategic Management and Strategic Development. *Journal of Business Management and Strategy*. Vol. 11, No. 1. Febr. 2020. P. 1 – 16. DOI: 10.5296/bms.v11i1.16505
12. Cooper L. N. An Introduction to the Meaning and Structure of Physics. Harper & Row. 1968. 746 p.
13. Cavendish H. Experiments to determine the density of the Earth. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London for the year 1798, Part II.*, pp. 469 – 526. <https://books.google.cat/books?id=O58mAAAAMAAJ&pg=PA59&hl>
14. Matalka R., DeShazo J. R., Callahan C. Moving Towards Resiliency: An Assessment of the Costs and Benefits of Energy Security Investment for the San Pedro Bay Ports. 2013. 58 p. URL: <http://innovation.luskin.ucla.edu/sites/default/files/Port%20Report.pdf>

References

1. Liudvik I. Improving the competitiveness of Ukraine's agro-industrial complex through innovative strategies: development and application of efficiency analysis models in the context of globalization. *Journal of Ekonomika ta Suspilstvo*. No. 68. 2024. P. 1 – 10. DOI: 10.32782/2524-0072/2024-68-79
2. Szeged S., Khakhula B., Lubar R., Khakhula L., Sytnyk O. Innovative agricultural policy as a factor for ensuring global food security. *Journal of Agrosvit*. No. 22. 2024. P. 51 – 57. DOI: 10.32702/2306-6792.2024.22.51
3. Cucura S.V., Krivoruchko O.V., Cucura M.I. Key performance indicators. Principles for developing key performance indicators for the budget sector. *Journal of Upravlinya rozvutkom skladnuh system*. No 10. 2012. P. 87 – 91. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Urss_2012_10_17

4. Rusaniuk V. V. Metrics of efficiency indicators of state support for small entrepreneurship in the agricultural sector. *Journal of Ekonomika APK. No 6.* 2021. P. 117 – 127. DOI: 10.32317/2221-1055.202106117
5. Zagirniak D., Stefkivska Y. Analysis of cereals and oil crops export and import optimization ways in aspect of Ukrainian agro-industrial complex institutionalization. *Journal of Vistnyk KrNU im. M. Ostrogradskogo. No. 150 (1).* 2025. P. 57 – 64. DOI: 10.32782/1995-0519.2025.1.7
6. Yanovska V., Król M., Pittman R. The logistics of grain exports from wartime Ukraine: What are the highest priority areas to Address? *Journal of Transportation Research Interdisciplinary Perspectives. Vol. 30.* March 2025. P. 1 – 13. DOI: 10.1016/j.trip.2025.101363
7. Sitnicki M.W., Kurinskyi D., Pimenowa O., Wasilewski M. and Wasilewska N. Strategic Formation of Agricultural Market Clusters in Ukraine: Emerging as a Global Player. *Journal of Sustainability. No. 16 (21).* July 2024. P. 1 – 21. DOI: 10.3390/su16219430
8. Zakharchuk O., Nechytailo V., Navrotskyi Ya., Kovalenko A. Development of grain logistics in Ukraine. *Journal of Ekonomika APK. No. 32 (3).* June 2025. P. 21 – 30. DOI: 10.32317/ekon.apk/3.2025.21
9. Rustumov R.Sh. Assessing the prospects for the development of grain logistics in Ukraine. *Journal of Zbirnyk naukovykh prac DNUZT im. ak. V.Lazaryana. No. 8.* 2014. P. 127 – 133. http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpdnu_tstp_2014_8_19
10. Moskvichenko I., Stadnik V., Pavlenko V. Regarding the efficiency of logistics schemes for exporting Ukrainian grain to consumer countries in the Asian region. *Journal of Naukovyi visnik UNU. No. 36.* 2021. P. 101 – 107. DOI: 10.32782/2413-9971/2021-36-18
11. Aleinikov A. G., Smarsh D. A. Viva Di Bartini: Eleven New Laws of Conservation Expanding Physics for Global Strategic Management and Strategic Development. *Journal of Business Management and Strategy. Vol. 11, No. 1.* Febr. 2020. P. 1 – 16. DOI: 10.5296/bms.v11i1.16505
12. Cooper L. N. An Introduction to the Meaning and Structure of Physics. Harper & Row. 1968. 746 p.
13. Cavendish H. Experiments to determine the density of the Earth. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London for the year 1798, Part II.*, pp. 469 – 526. <https://books.google.cat/books?id=O58mAAAAMAAJ&pg=PA59&hl>
14. Matalka R., DeShazo J. R., Callahan C. Moving Towards Resiliency: An Assessment of the Costs and Benefits of Energy Security Investment for the San Pedro Bay Ports. 2013. 58 p. URL: <http://innovation.luskin.ucla.edu/sites/default/files/Port%20Report.pdf>