

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 631.3:656.13:519.87

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2026.112.0.293

ВИБІР ТЕХНОЛОГІЇ РОБОТИ ЗБИРАЛЬНО-ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСУ ПІД ЧАС ЖНИВ НА ОСНОВІ ІНДЕКСУ ЗБАЛАНСОВАНOSTІ

Музильов Д. О., Чеховський Д. В.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. У статті розглянуто дисбаланс пропускної здатності комбайнової, транспортної та приймальної ланок збирально-транспортно-комплексу (ЗТК), який використовується під час жнив та спричиняє черги, простої і збільшення витрат. Як основний критерій визначення дисбалансу між збиральним і транспортним комплексами запропоновано використовувати індекс збалансованості ЗТК, $K_{ЗТК}$. Розроблено регресійні моделі для швидкого вибору технології взаємодії ланок ЗТК. Для п'яти схем розраховано $K_{ЗТК}$ та визначено тривалість збирання й питомі витрати. Доведено, що збільшення $K_{ЗТК}$ з 0,26 до 1,37 скорочує тривалість збирання врожаю зернових з 16,84 до 4,61 діб, а отже, і в знижує витрати з 1400,76 до 570,83 грн/т. За результатами дослідження рекомендовано використовувати транспортно-технологічну схему, що забезпечує норматив збирання врожаю $T \leq 10$ діб.

Ключові слова: збирально-транспортний комплекс, пропускна здатність, індекс збалансованості, черга, простій автомобіля, тривалість збирання, питомі витрати, регресійна модель.

Вступ

Під час жнив збирально-транспортний комплекс працює в умовах короткого часово-погодного вікна, а будь-яка неузгодженість між комбайновою, транспортною та приймальною ланками швидко перетворюється на черги, простої і збільшення питомих витрат за збір 1 т врожаю. Типовою технологічною ситуацією є взаємодія елементів ЗТК: комбайн вимушено знижує темп або зупиняє обмолот через відсутність транспорту для розвантаження, тоді як транспорт накопичується в очікуванні завантаження або затримується на прийманні чи в дорозі [1]. Через це господарство не вкладається в агротехнічні строки, збільшується ризик втрат урожаю, а отже, і зниження його якості, також збільшуються витрати пального й оплати праці. У сучасних наукових дослідженнях ці ефекти розглядаються як прояв логістичних обмежень у пікові періоди, що знижують стійкість агропродовольчих систем і погіршують показники продовольчої безпеки [2].

Водночас склад збирально-транспортного комплексу і часто вибирають за середніми нормативами продуктивності й спрощеними розрахунками тривалості часу обертання вантажів, які здійснюють вивезення зібраного врожаю. Проте фактичний процес є нерівномірним з певним рівнем невизначеності, що насамперед обумовлено значеннями таких техніко-експлуатаційних показників (ТЕП)

роботи рухомого складу, як час завантаження, рух, маневрування та розвантаження. Одночасно обмеження приймальної інфраструктури та сезонні піки навантаження створюють нелінійні впливи, які не можна чітко прослідкувати в середніх оцінюваннях. З іншого боку, детерміновані методики підбору техніки та аналітичні моделі на основі теорії масового обслуговування коректно описують причину простоїв і вказують на критичність балансу ланок, але для оперативного технологічного вибору вимагають або значного обсягу вихідних даних, або проведення певної серії дослідів із відповідними розрахунками [3, 4]. Водночас системні підходи до підвищення ефективності транспортного забезпечення ЗТК і моделювання в умовах невизначеності поглиблюють опис процесу, однак математичний підхід у цьому випадку має бути достатньо компактним і відтворюваним для реалізації на практиці в агропромислових господарствах [5, 6]. Крім того, імітаційні моделі, зокрема із використанням GPSS-трекінгу, забезпечують високу деталізацію черг, але потребують попереднього калібрування моделі та часу на первинну її формалізацію й розроблення, що обмежує їх використання як швидкого засобу попереднього вибору технології [7].

Відомі підходи зазвичай або концентруються на окремих елементах (черги, транспортна схема, ризики), або подають деталізо-

вану, але ресурсомістку імітацію процесу роботи збирально-транспортного комплексу, не перетворюючи результати на простий відтворюваний критерій для вибору технології і попереднього узгодження складу ЗТК. У цій роботі запропоновано використовувати інженерно-інтерпретований індекс збалансованості ЗТК, $K_{ЗТК}$, який відображає співвідношення вихідної пропускної здатності системи та продуктивності комбайнової ланки (рис. 1). Вищезазначений індекс враховано в регресійних моделях, що пов'язують $K_{ЗТК}$ і ключові фактори процесу з двома результатами, критичними для рішення, – тривалістю кампанії та питомими витратами на збір 1 т врожаю. Це дає можливість швидко порівнювати альтернативні схеми організації ЗТК й уточнювати склад комплексу з урахуванням невизначеності та ризиків, зокрема на основі нечітких оцінок факторів середовища [8, 9].

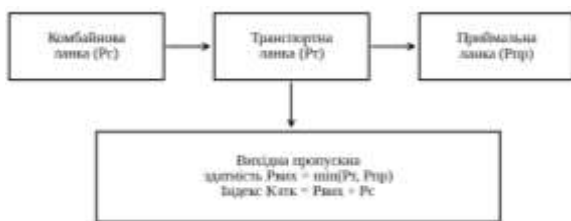


Рис. 1. Структура ЗТК та логіка формування індексу $K_{ЗТК}$

Аналіз публікацій

Збирально-транспортний комплекс у період жнив доцільно розглядати як багатоланкову систему із внутрішніми чергами, де результат визначається пропускною здатністю кожної ланки та їх узгодженістю. Для завдання підбору складу техніки запропоновано методики, які порівнюють технологічні схеми доставки та визначають необхідну кількість транспортних засобів для необхідних умов роботи [3]. Розвиток цього підходу здійснюється в межах оптимізаційних моделей на основі теорії масового обслуговування, де мінімізують суму витрат від простоїв комбайнів й утримання автопарку [4].

Водночас реальна робота ЗТК суттєво залежить від невизначеності часу операцій і зовнішніх факторів. У низці дисертаційних досліджень запропоновано системний підхід до збільшення рівня ефективності транспортного забезпечення ЗТК з акцентом на узгодження параметрів ланок і скорочення втрат від очікування [5]. У роботі, орієнтованій на аналіз невизначених умов, підкреслено доці-

льність використання моделювання розгляду сценаріїв і вироблення стійких рішень щодо складу збирально-транспортного комплексу [6].

У дослідженнях сучасного напрямку щодо покращення стійкості транспортних систем і продовольчої безпеки зазначено, що сезонні піки та інфраструктурні обмеження є одними з ключових вразливостей агрологістики [1, 2]. Водночас для інженерних завдань підбору складу ЗТК формується напрям гібридних підходів, де аналітичні розрахунки доповнюють нечітким оцінюванням ризиків і логіко-лінгвістичними моделями. Це дозволяє враховувати неповну інформацію про майбутній процес збору врожаю («погодні вікна», збої приймання сільськогосподарського вантажу, відмови техніки) й оцінювати потребу в транспорті в умовах невизначеності [8, 9].

Практико-орієнтовані дослідження доповнюють технологічну частину рішення через удосконалення схем вивезення від комбайнів і технічних засобів для збільшення рівня продуктивності транспортування. Зокрема розглянуто вдосконалення технології транспортування зерна від комбайнів у контексті взаємодії агрегатів у полі [10], а також наведено рішення щодо скорочення часу операцій і підвищення ефективності збирально-транспортних машинних комплексів для зернових культур [11]. Для бурякоцукрового виробництва продемонстровано можливості моделювання транспортного процесу в технологічному комплексі бурякозбиральних машин [12].

Імітаційне моделювання одним із найкращих інструментів відтворення динаміки черг і простоїв. Запропоновано методологію розроблення імітаційної моделі збирально-транспортного комплексу (GPSS) для оцінювання альтернативних сценаріїв роботи та перевірки організаційних рішень [7]. Крім того, для господарств важливим є наявність швидких інструментів попереднього вибору технології, коли немає часу на деталізовану імітацію. Тому актуальним є поєднання інженерно-інтерпретованого індикатора дисбалансу ($K_{ЗТК}$) та статистично перевірених результатів регресійних моделей (T , C), що забезпечує відтворюваність, прозорість і можливість порівняння альтернатив за різними сценаріями розвитку транспортно-технологічної ситуації, яка виникає в межах роботи ЗТК.

У ширшому логістичному контексті вибір технології взаємодії у збирально-транспорт-

ному комплексі є частиною управлінських рішень щодо поведінки перевізника, стратегії обслуговування комбайнів на кожному полі та узгодження параметрів доставки з обмеженнями інфраструктури, що доводить доцільність використання компактних індикаторів для прийняття рішень у складних системах [13–14].

Отже, під час аналізу поточних публікацій було визначено, що наявні підходи або детально моделюють окремі елементи роботи збирально-транспортного комплексу (черги, транспортні операції, приймання), або потребують трудомісткого імітаційного налаштування, але нечасто дають простий відтворюваний критерій для швидкого вибору технології та узгодження пропускних здатностей логістичних ланок, що взаємодіють під час збору врожаю. Наше дослідження закриває цей пробіл у поточних знаннях, пропонуючи інженерно інтерпретований показник збалансованості та побудовані на його основі регресійні моделі для оперативного прийняття рішень у піковий період жнив, коли обмежений час й інфраструктурні «вузькі місця» безпосередньо впливають на втрати врожаю, якість і витрати логістики в агропромисловому секторі економіки України.

Мета та постановка завдання

Метою дослідження є підвищення логістичної ефективності збирально-транспортного комплексу під час жнив через обґрунтування показника збалансованості $K_{ЗТК}$ та побудову регресійних моделей, що дозволяють вибрати раціональну технологію взаємодії комбайнової, транспортної і приймальної ланок за критеріями тривалості кампанії збирання та питомих витрат.

Для досягнення мети потрібно вирішити такі завдання:

- провести натурні спостереження параметрів процесу збирання та вивезення врожаю;
- сформулювати набір альтернативних схем взаємодії ланок ЗТК і розрахувати їхні пропускні здатності;
- ввести й обґрунтувати індекс $K_{ЗТК}$ як інтегральний показник збалансованості;
- побудувати регресійні моделі для прогнозування тривалості збирання (T) та питомих витрат (C) як функцій ключових факторів;
- здійснити вибір раціональної технології на основі сумісного аналізу $T(K_{ЗТК})$ та $C(K_{ЗТК})$ з урахуванням нормативних обмежень.

Виклад основного матеріалу

Збирально-транспортний комплекс розглянуто як систему, у якій комбайнова ланка формує потік продукції, транспортна ланка забезпечує підвезення до пункту приймання, а приймальна ланка (елеватор, перевантажувальний вузол) визначає граничну інтенсивність розвантаження. З практичної точки зору зручним є індикатор, що відображає баланс між «вихідною» пропускну здатністю системи та продуктивністю комбайнової ланки. Тому в дослідженні було введено індекс збалансованості ЗТК, $K_{ЗТК}$, що визначається як

$$K_{ЗТК} = \frac{P_{вих}}{P_c}, \quad (1)$$

де $P_{вих}$ – вихідна пропускна здатність ЗТК, т/год; P_c – пропускна здатність комбайнової ланки, т/год.

Вихідна пропускна здатність логістичної частини після комбайна для конкретної схеми визначається як мінімум між можливостями транспортної і приймальної ланок:

$$P_{вих} = \min(P_t, P_{дон}, P_{прийм}), \quad (2)$$

де P_t – фактична пропускна здатність транспортної ланки, т/год; $P_{дон}$ – пропускна здатність ланки під час допоміжних операцій (перевантажувач, навантажувач, польовий бункер-перевантажувач тощо, якщо використання цих елементів ЗТК передбачено відповідною транспортно-технологічною схемою), т/год; $P_{прийм}$ – пропускна здатність приймання зерна на елеваторі, т/год.

Для транспортної ланки пропускну здатність визначено за виразом

$$P_t = \sum_{j=1}^m \frac{q_{\phi_j}}{t_{об_j}}, \quad (3)$$

де q_{ϕ_j} – фактична вантажопідйомність j -го зернового за рейс, т; $t_{об_j}$ – час оберт j -го зернового, год.

Тривалість оберт $t_{об}$ автомобіля-зернового можна визначити як

$$t_{об} = t_{пyx} + t_{н-p} + t_{чep}, \quad (4)$$

де $t_{пyx}$ – час руху автомобіля-зернового із зерновим вантажем та порожнім, год; $t_{н-p}$ –

час навантаження та розвантаження зерново-за, год; $t_{чер}$ – час очікування черги зерновозом, год.

Таким чином, тривалість процесу збиральних робіт зменшується зі збільшенням $K_{ЗТК}$, тоді як питомі витрати визначаються як функція масштабу робіт, транспортного плеча та прийнятої транспортно-технологічної схеми. Саме тому показник $K_{ЗТК}$ використано як узагальнювальний індикатор для порівняння альтернативних варіантів організації ЗТК.

Водночас потрібно зазначити, що $K_{ЗТК} < 1$ дорівнює дефіциту транспортно-приймальної частини, $K_{ЗТК} = 1$ – близькому балансу, а $K_{ЗТК} > 1$ – надлишковій пропускній здатності комбайнів, що зазвичай зменшує простої і час збиральної кампанії, але може бути економічно надмірною.

Показник збалансованості збирально-транспортного комплексу розглядається як керована змінна управлінського рішення. Він відображає, скільки і яких одиниць техніки долучають до збирально-транспортного комплексу у вибраній схемі взаємодії ланок. Цей показник є спільним аргументом для первинного набору параметрів під час побудови обох регресійних моделей, оскільки має різноспрямований вплив на результат: збільшення показника зазвичай скорочує тривалість збирання через зменшення простоїв і підвищення ритмічності процесу, але водночас може збільшувати питомі витрати через залучення додаткової техніки, збільшення амортизаційних і паливних витрат і витрат на персонал. Саме пошук вищезазначеного компромісу «час – витрати» є підставою для подальшого об'єднання двох моделей в єдине рішення щодо вибору раціональної технології та складу комплексу.

Тому в роботі використано дві функції відгуку. Перша цільова функція описує тривалість збирання (або інтенсивність проведення робіт), друга – питомі витрати на збирання та транспортування:

$$T = f(Q_d, P_c, P_t, K_{ЗТК}) \rightarrow \min, \quad (5)$$

де Q_d – добовий потік зібраного врожаю (зерна), т/добу.

Тоді цільова функція питомих витрат на збирання та вивезення врожаю з полів визначається так:

$$C = f(Q_d, L, A, K_{ЗТК}) \rightarrow \min, \quad (6)$$

де L – середньозважена відстань перевезення зібраного врожаю, км; A – площа збирання (масштаб робіт), га.

Емпіричні дані отримано під час натурних спостережень ($n = 200$) з фіксацією швидкості руху, часу під'їзду, маневрування, тривалості розвантаження, простоїв під завантаженням-розвантаженням.

Об'єктом натурних спостережень був процес функціонування збирально-транспортного комплексу під час збирання зернових культур у типовому виробничому масиві площею 120 га за урожайності 5,5 т/га та середній відстані перевезення зерна 18 км. Базовий склад збирально-транспортного комплексу налічував 2 комбайни, 5 зерновозів вантажопідйомністю 20 т, тривалість роботи ЗТК становила 12 год/добу, робочу ширину жатки – 7,0 м, коефіцієнт польової ефективності – 0,75. Під час натурних спостережень фіксувалися швидкість руху комбайна, швидкість руху зерновоза, тривалість розвантаження, а також допоміжні складові транспортного циклу: під'їзд, маневрування та очікування в черзі.

Результати ідентифікації законів розподілу випадкових величин, які використовувалися для визначення пропускних здатностей ланок збирально-транспортного комплексу та в подальшому розрахунку індексу збалансованості ЗТК, $K_{ЗТК}$, узагальнено в табл. 1.

Таблиця 1 – Закони розподілу випадкових величин для моделювання взаємодії ЗТК

Випадкова величина	Закон розподілу	Параметри
Швидкість руху комбайна V_k , км/год	Нормальний	$\mu = 6,08$; $\sigma = 0,84$
Швидкість руху зерновоза V_z , км/год	Нормальний	$\mu = 44,2$; $\sigma = 6,66$
Час розвантаження зерновоза t_p , хв.	Експоненційний	$\mu = 6,1$; $\sigma = 11,3$

Отримані під час натурних спостережень швидкості руху комбайна V_k , зерновоза V_z та тривалість розвантаження t_p використані для визначення параметрів пропускної здатності збиральної і транспортної ланок. Допоміжні часові складові, що не винесені в окремі закони розподілу, враховувалися в структурі часу оберту як середні сервісні доповнення. Додатковий час на під'їзд, маневрування становив 4 хв, а середній час очікування в черзі – 8 хв.

Такий підхід дозволив, з одного боку, врахувати стохастичність ключових параметрів процесу, а з іншого, – не перевантажу-

вати модель надлишковою деталізацією другорядних операцій. На основі технологічних альтернатив сформовано п'ять схем взаємодії ланок (I–V), що відрізняються способом завантаження в полі, організацією підвезення (прямий підвіз, «шатл», перевантаження) та режимом приймання.

Технологічні параметри схем I–V відрізняються складом проміжних ланок між комбайном і пунктом приймання та набором потенційних обмежень пропускної здатності. Схема I передбачає пряме відвантаження з комбайна до зернового із доставкою на пункт приймання. Тобто її критичними елементами є транспорт і приймання. Схема II реалізує роботу крізь проміжну буферну ланку, що зменшує залежність комбайна від «дальнього рейсу», але додає обмеження за підвезенням і перевантаженням. Схема III є двоступеневою технологією з проміжним накопиченням, у якій розділяються внутрішньопольове та магістральне транспортні плечі. Схема IV ґрунтується на тимчасовому польовому накопиченні зерна та використовується в разі дефіциту транспорту або нестабільного приймання. Схема V передбачає польовий перевантажувальний пункт, що дає змогу зменшити ризик простоїв комбайнів завдяки відокремленню короткого плеча вивезення від дальнього транспортування. Таким чином, відмінності між схемами полягають не лише в способі організації перевезень, а й у структурі лімітувальних ланок, що безпосередньо впливають на $P_{вх}$ і, відповідно, на значення $K_{ЗТК}$.

Для кожної схеми розраховано P_c і P_b , після чого отримано $K_{ЗТК}$ (табл. 2).

Таблиця 2 – Пропускні здатності ланок і значення $K_{ЗТК}$ для альтернативних схем (приклад для комбайнової ланки CLAAS)

Схема	P_c , т/год	P_b , т/год	$K_{ЗТК}$
I	35,11	53,36	1,52
II	35,11	48,80	1,37
III	35,11	9,07	0,26
IV	35,11	34,69	0,99
V	35,11	30,31	0,86

Отже, показник $K_{ЗТК}$ у роботі використовується не як умовний коефіцієнт, а як інтегральна характеристика збалансованості збиральної, транспортної та приймальної ланок. Значення $K_{ЗТК} < 1$ свідчить про дефіцит пропускної здатності післякомбайнової частини системи та ризик простоїв збиральної ланки, тоді як $K_{ЗТК} > 1$ визначає наявність резерву транспортно-приймальної спроможності щодо фактичної продуктивності комбайна. Та-

кий розподіл значення $K_{ЗТК}$ для альтернативних схем наведено на рисунку 2. Найменший рівень збалансованості між комбайновою та фактичною ланками за пропускними здатностями спостерігається в схемі III, що передбачає використання двоступеневої технології з проміжним накопиченням зерна через появу додаткових проміжних ланок і збільшення імовірності втрат часу в межах двоступеневої організації процесу.

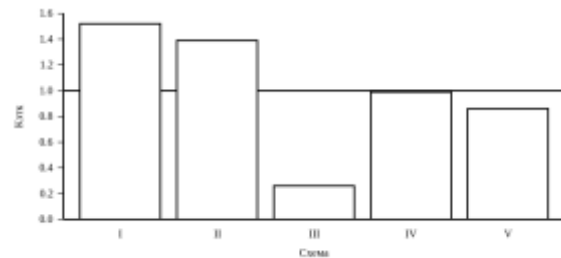


Рис. 2. Значення індексу $K_{ЗТК}$ для альтернативних схем організації ЗТК

Для сценарного узагальнення впливу розміру робіт і збалансованості ланок ЗТК використано повнофакторний експеримент 2^4 з такими факторами: добовий потік зерна Q_d , середньозважена відстань перевезення L , пропускна здатність комбайнової ланки P_c та індекс $K_{ЗТК}$. Оскільки вхідні змінні задано в логарифмічній шкалі, аналіз здійснено як множинну лінійну регресію для $\ln T$ та $\ln C$. Отримані нелінійні регресійні моделі можна записати так:

$$\ln T = 6,952933 - 1,000056 \ln Q_d - 0,773149 \ln K_{ЗТК}, \quad (7)$$

$$T = 1046,214 \cdot Q_d^{-1,000056} \cdot K_{ЗТК}^{-0,773149}, \quad (8)$$

$$\ln C = 9,145752 - 0,691849 \ln Q_d + 0,238281 \ln L - 0,535490 \ln K_{ЗТК}, \quad (9)$$

$$C = 9374,529 \cdot Q_d^{-0,691849} \times L^{0,238281} \cdot K_{ЗТК}^{-0,53549}. \quad (10)$$

Статистичні показники доводять адекватність розроблених регресійних моделей для тривалості збирання та для питомих витрат на збирання та транспортування врожаю (табл. 3). Для вибору раціональної технології взаємодії збиральної, транспортної та приймальної ланок використано дві регресійні моделі. Перша описує зміну тривалості збиральної кампанії T , друга – зміну питомих витрат на збирання C .

Таблиця 3 – Зведена таблиця результатів регресійного аналізу

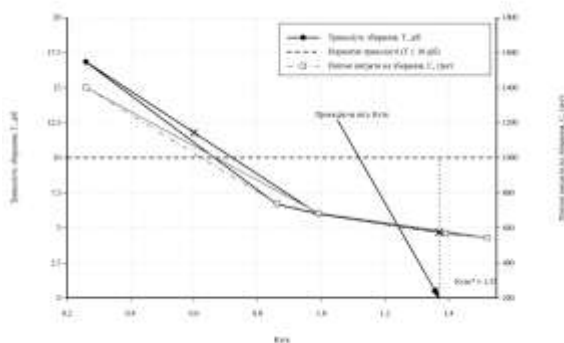
Показник	Регресія для T	Регресія для C
Множинний коефіцієнт кореляції, R	1,00	0,971091
Коефіцієнт детермінації, R^2	1,00	0,943018
Скоригований коефіцієнт детермінації, R^2	1,00	0,928773
Стандартна помилка регресії	4.78933E-15	0,208624
Кількість спостережень	16	16
F -критерій (ANOVA)	3,38424E29	66,197952
Рівень значущості F	2,2001E-187	9,7902E-08
Кількість значущих факторів (фінальна модель)	2	3

Для формування розрахункової табл. 4 як змінну використано показник збалансованості збирально-транспортного комплексу; п'ять рядків дорівнюють п'яти схемам у порядку збільшення цього показника – від мінімального до максимального рівня в межах повного факторного експерименту. Інші фактори зафіксовано на середніх значеннях між мінімальним і максимальним рівнями експерименту: $\ln Q_d = 4,955728$ та $\ln L = 3,453878$.

Таблиця 4 – Залежність тривалості збирання та питомих витрат від $K_{ЗТК}$

Схема	$K_{ЗТК}$	T , діб	C , грн/т
I	1,52	4,30	544,14
II	1,37	4,61	570,83
III	0,26	16,84	1400,76
IV	0,99	5,99	684,58
V	0,86	6,68	738,18

На рис. 3 наведено узагальнену залежність T і C від $K_{ЗТК}$, що ілюструє ефект збалансованості ланок на результативність ЗТК.

Рис. 3. Вплив $K_{ЗТК}$ на тривалість збирання T та питомі витрати C (за середніх значень інших факторів)

Згідно з табл. 4 та рис. 3, зі збільшенням $K_{ЗТК}$ одночасно зменшуються і тривалість кампанії збирання врожаю, і питомі витрати на транспортування та збирання. Найгірша альтернатива (схема III) визначається критичним дефіцитом транспортно-приймальної частини ($K_{ЗТК} = 0,26$), що формує тривалі

черги, простої та різке збільшення витрат. Схеми I та II демонструють найкращі результати за T і C , але можуть вимагати більшої кількості транспортних одиниць і дисципліни приймання. Для вибору варіанта роботи ЗТК з урахуванням наявних практичних рекомендацій щодо термінів збирання конкретної сільськогосподарської культури (наприклад зерна) додатково враховано норматив за тривалістю $T \leq 10$ діб. У цьому контексті раціональною є схема II ($K_{ЗТК} = 1,37$), що є найближчою до орієнтовної точки компромісу та такою, що забезпечує виконання нормативу за помірних витрат.

Варто зазначити, що отриманий під час дослідження результат узгоджується з висновками інших авторів про те, що оптимізація збирально-транспортного комплексу потребує не лише мінімізації простоїв комбайнів, а й раціональної організації транспортного процесу та розвантаження, які визначають «вузьке місце» системи [3–5, 8]. З практичного погляду врахування ризик-факторів (погода, відмови техніки, зміни режиму приймання) доцільно реалізовувати через сценарні коригування параметрів P_c , P_t та P_{np} і повторний розрахунок $K_{ЗТК}$, що узгоджується з підходами нечіткого оцінювання невизначеності для аграрних ланцюгів постачання [8].

Висновки

Обґрунтовано індекс $K_{ЗТК}$ як інтегральний показник збалансованості збирально-транспортного комплексу, що порівнює вихідну пропускну здатність системи з продуктивністю комбайнної ланки та відображає ризик формування черг і простоїв.

На основі натурних спостережень ($n = 200$) і сценарного аналізу п'яти схем взаємодії ланок доведено, що збільшення $K_{ЗТК}$ забезпечує одночасне зниження тривалості кампанії та питомих витрат; якщо $K_{ЗТК} = 0,26$, то $T = 16,84$ діб, а $C = 1400,76$ грн/т, а якщо $K_{ЗТК} = 1,37$, $T = 4,61$ діб і $C = 570,83$ грн/т.

Побудовано нелінійні регресійні моделі для прогнозування T і C як функцій Q_d , L і $K_{ЗТК}$, які

можуть використовуватись для швидкого попереднього узгодження парку техніки та вибору технології без трудомісткої імітації.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розширенням кейсу на інші культури (зокрема буряки), інтеграцією показників ризику та стійкості (погодні вікна, відмови, обмеження приймання) та валідацією метамоделей для різних типів техніки і логістичної інфраструктури.

Література

- Hossain S., Kashem S. B. Transportation resilience and food security: developing a conceptual framework through literature review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2025. Vol. 9. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1569474>
- Farm-level adaptations to harvest logistics constraints in export-oriented grain systems / Garima et al. *Agricultural Systems*. 2026. Vol. 231. P. 104565. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2025.104565>
- Обґрунтування способів експлуатаційного забезпечення зернозбиральних комбайнів запасними частинами / D. Domushchi та ін. *Аграрний вісник Причорномор'я*. 2020. № 95. С. 199–209. <https://doi.org/10.37000/abbsl.2019.95.28>
- Моделювання складу збирально-транспортного комплексу для врожаю зернових як системи масового обслуговування / В. Г. Загоряньський та ін. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2019. Вип. 2. С. 146–151. <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2019.2.146-151>
- Медведєв Є. П. Підвищення ефективності транспортного забезпечення збирально-транспортного комплексу: дис. ...канд. техн. наук: 05.22.01. Северодонецьк, 2019. 212 с.
- Modelling approach to the transport support for the harvesting and transportation complex under uncertain conditions / I. Medvediev et al. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 977. 012003.
- Design logical linguistic models to calculate necessity in trucks during agricultural cargoes logistics using fuzzy logic / I. Medvediev et al. *Acta Logistica*. 2020. Vol. 7(3). P. 155–166. <https://doi.org/10.22306/al.v7i3.165>
- Muzylyov D., Medvediev I., Pavlenko O. Risk factor assessment in agricultural supply chain by fuzzy logic. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024. Vol. 1376. 012038. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1376/1/012038>
- Удосконалення технології транспортування зерна від комбайнів / С. Г. Фришев та ін. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2022. №6(315). С. 203–207. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-203-207>
- Ways to grow the efficiency of the harvesting and transport technological machine complex for grain crops / S. Fryshev et al. *Mechanization in Agriculture & Conserving of the Resources*. 2022. Vol. 68(2). P. 65–68.
- Modeling of transportation process in a technological complex of beet harvesting machines / M. Volokha et al. *Journal of Engineering Sciences*. 2023. Vol. 10(2). P. F1–F9. [https://doi.org/10.21272/jes.2023.10\(2\).f1](https://doi.org/10.21272/jes.2023.10(2).f1)
- Muzylyov D., Shramenko N., Karnaukh M. Choice of Carrier Behavior Strategy According to Industry 4.0. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham. 2021. P. 213–222. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_22
- Modeling grain transportation in the system of grain processing industries / A. Saparbayev et al. *SHS Web of Conferences*. 2021. Vol. 107. P. 06003. <https://doi.org/10.1051/shsconf/202110706003>
- Wu J., Haasis H.-D. The freight village as a pathway to sustainable agricultural products logistics in China. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 196. P. 1227–1238. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.077>

References

- Hossain, S., Kashem, S. B. (2025). Transportation resilience and food security: developing a conceptual framework through literature review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, vol. 9, article 1569474. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1569474>
- Garima, Olaru D., Smith, B., Siddique, K. H. M. (2026). Farm-level adaptations to harvest logistics constraints in export-oriented grain systems. *Agricultural Systems*, vol. 231, article 104565. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2025.104565>
- Domushchi, D., Ustuyanov, P., Lipin, A., Zakharenko, V. (2019). Substantiation of methods for operational support of grain harvesters with spare parts. *Ahrarnyi visnyk Prychornomia (Agrarian Bulletin of the Black Sea Littoral)*, no. 95, p. 199–209. <https://doi.org/10.37000/abbsl.2019.95.28>
- Zahorianskyi, V. H., Haikova, T. V., Khorolskyi, V. L., Kuzev, I. O. (2019). Modeling the composition of a harvesting-transport complex for grain harvest as a queuing system. *Visnyk Kremenchuk-Ostrohradskoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho (Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University)*, issue 2 (115), p. 146–151. <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2019.2.146-151>
- Medvediev, Ye. P. (2019). Improving the efficiency of transport support of the harvesting-transport complex. PhD thesis (Cand. Tech. Sci.), specialty 05.22.01. Sievierodonetsk. 212 p.
- Medvediev, I., Muzylyov, D., Shramenko, N., Nosko, P., Ivanov, V. (2020). A modelling approach to the transport support for the harvesting and transportation complex under uncertain conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 977. 012003. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/977/1/012003>
- Medvediev, I., Muzylyov, D., Shramenko, N., Nosko, P., Eliseyev, P., Ivanov, V. (2020).

- Design logical linguistic models to calculate necessity in trucks during agricultural cargoes logistics using fuzzy logic. *Acta Logistica*, vol. 7(3), p. 155–166. <https://doi.org/10.22306/al.v7i3.165>
8. Muzylyov, D., Medvediev, I., Pavlenko, O. (2024). Risk factor assessment in agricultural supply chain by fuzzy logic. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1376, 012038. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1376/1/012038>
 9. Fryshev, S. H., Lukach, V. M., Ikalchik, M. V., Vasyliuk, V. V. (2022). Improvement of grain transportation technology from combines. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky (Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences)*, no. 6, vol. 1 (315), p. 203–207. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-203-207>
 10. Fryshev, S., Lukach, V., Ikalchik, M., Kushnirenko, A. (2022). Ways to grow the efficiency of the harvesting and transport technological machine complex for grain crops. *Mechanization in Agriculture & Conserving of the Resources*, vol. 68(2), p. 65–68.
 11. Volokha M., Rogovskii I., Fryshev S., Sobczuk H., Virchenko G., Yablonskyi P. (2023). Modeling of transportation process in a technological complex of beet harvesting machines. *Journal of Engineering Sciences*, vol. 10(2), p. F1–F9. [https://doi.org/10.21272/jes.2023.10\(2\).f1](https://doi.org/10.21272/jes.2023.10(2).f1)
 12. Muzylyov, D., Shramenko, N., Karnaukh, M. (2021). Choice of carrier behavior strategy according to Industry 4.0. In: Ivanov V., Trojanowska J., Pavlenko I., Zajac J., Peraković D. (eds). *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. DSMIE 2021*. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham: Springer, p. 213–222. https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_22
 13. Saparbayev, A. et al. (2021). Modeling grain transportation in the system of grain processing industries. *SHS Web of Conferences*, vol. 107, 06003. <https://doi.org/10.1051/shsconf/202110706003>
 14. Wu, J., Haasis, H.-D. (2018). The freight village as a pathway to sustainable agricultural products logistics in China. *Journal of Cleaner Production*, vol. 196, p. 1227–1238. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.077>

Музильов Дмитро Олександрович, к.т.н., доц. каф. транспортних технологій, muzylyov_d@ukr.net, тел. +38 068-092-41-70

Чеховський Дмитро Вадимович, студент факультету транспортних систем, chd20012001@ukr.net, тел. +38 099-464-16-30

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна.

Selecting an Operating Technology for a Harvesting-Transport Complex Based on a Balance Index

Abstract. Problem. Harvesting and transport operations are executed in a short time window, while capacity mismatch among the combine, transport and receiving links generates queues, idle time and cost escalation. These effects become critical under seasonal peaks and infrastructure constraints, reducing the reliability of on-farm logistics. **Goal.** To introduce a compact balance indicator for a harvesting and transport complex (HTC) and to build regression metamodels for selecting a rational interaction technology based on harvesting duration and specific cost. **Methodology.** Field observations ($n = 200$) were used to parameterize operation times and to compare five alternative interaction schemes. Link capacities were computed and aggregated into the K_{zmk} index defined as the ratio of the system output capacity to the combine-link capacity. A 2^4 full factorial design and log-log regression were applied to model $\ln T$ and $\ln C$ as functions of Q_{db} , L and K_{zmk} ; model adequacy was verified by determination coefficients and significance tests. **Results.** Both duration and specific cost decrease monotonically with higher K_{zmk} : for $K_{zmk} = 0.26$ the model yields $T = 16.84$ days and $C = 1400.76$ UAH/t, while for $K_{zmk} = 1.37$ it yields $T = 4.61$ days and $C = 570.83$ UAH/t. A practically feasible technology meeting the constraint $T \leq 10$ days was selected as a compromise between time reduction and resource intensity. **Originality.** The study combines a physically interpretable balance index with statistically validated metamodels, enabling rapid scenario screening without computationally heavy simulation. **Practical value.** The approach supports preliminary fleet sizing, technology selection and stress testing of HTC configurations under uncertain operating conditions (delays, receiving limitations), which is useful for farm managers and logistics planners.

Key words: harvesting-transport complex, throughput capacity, balance index, queue, truck idle time, harvesting duration, unit costs, regression model.

Muzylyov Dmitriy, Ph.D., Assoc. Prof., Department of Transport Technology, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8540-6987>, muzylyov_d@ukr.net, **Chekhovskiy Dmytro**, student of the Faculty of Transport Systems, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4564-7834>, chd20012001@ukr.net

Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudroho str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Стаття надійшла до редакції / Received: 16.02.2026.

Прийнята до друку після рецензування / Revised and Accepted: 26.02.2026.

Дата публікації статті / Published: 11.05.2026.