

В. В. Буряк
А. А. Кашканов

МЕТОДИКА СИНТЕЗУ ІНТЕГРОВАНОЇ ЛОГІСТИЧНО-ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ДОСТАВКИ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР В УМОВАХ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ

Вінницький національний технічний університет

У статті представлено методику синтезу інтегрованої логістично-інформаційної системи доставки зернових культур, що враховує сучасні виклики цифрової трансформації аграрного сектору. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності логістичних процесів, забезпечення простежуваності вантажів, зниження експлуатаційних витрат та відповідності міжнародним стандартам управління якістю і безпечністю (ISO 22000, ДСТУ ISO 9001). Запропонована методика базується на поетапному синтезі системи, що включає формалізацію об'єкта, побудову архітектури, сценарне моделювання, аналітичну оптимізацію та верифікацію.

Система розглядається як багаторівнева структура, що поєднує логістичні, інформаційні та аналітичні компоненти. Логістичний рівень охоплює маршрути, графіки, транспортні засоби та інфраструктуру. Інформаційний рівень включає телематику, IoT-модулі, ERP-інтеграцію та цифровий документообіг. Аналітичний рівень реалізує прогнозування, оптимізацію маршрутів, оцінку ризиків і моніторинг показників ефективності. Особливу увагу приділено сценарному моделюванню, що дозволяє враховувати сезонні, погодні, технічні та організаційні фактори при плануванні перевезень.

У межах дослідження запропоновано математичну модель витрат, функції якості перевезень, обмеження на навантаження та критерії ефективності. Розроблено алгоритм синтезу системи, який забезпечує адаптивність до змін середовища, масштабованість та нормативну відповідність. Проведено верифікацію методики на основі пілотних сценаріїв, що підтвердило зниження витрат, підвищення точності доставки та зменшення втрат якості зерна.

Результати дослідження можуть бути використані для розробки цифрових платформ управління аграрною логістикою, формування технічної документації, акредитаційних матеріалів та впровадження інноваційних рішень у транспортних системах аграрного сектору.

Ключові слова: логістика зернових культур, інтегровані транспортні системи, інформаційно-аналітичні платформи, сценарне моделювання, показники ефективності логістичних процесів.

Вступ

Рационалізація логістичних процесів у сфері аграрних перевезень є одним із ключових завдань сучасної транспортної інженерії, особливо в умовах цифрової трансформації та зростаючих вимог до якості, простежуваності та нормативної відповідності [1]. Зернові культури, як стратегічно важливий елемент продовольчої безпеки, потребують не лише ефективної системи доставки, але й інтеграції інформаційних технологій, що забезпечують контроль, адаптивність і оптимізацію перевезень [2].

Традиційні моделі управління перевезеннями зернових, що базуються на фрагментарних логістичних рішеннях, не здатні забезпечити належний рівень гнучкості, цифрової інтеграції та відповідності міжнародним стандартам, зокрема ISO 22000 (системи управління безпечністю харчових продуктів) та ДСТУ ISO 9001 (системи управління якістю). У зв'язку з цим виникає потреба у створенні інтегрованої логістично-інформаційної системи, яка поєднує фізичні, цифрові та аналітичні компоненти в єдину керовану структуру.

Цифрова трансформація логістики передбачає впровадження телематики, IoT-модулів, ERP-систем [3], а також аналітичних платформ для прогнозування ризиків, оптимізації маршрутів та оцінки ефективності перевезень. Така система має забезпечувати не лише оперативне управління транспортними засобами (ТЗ), а й автоматизовану обробку даних, сценарне моделювання та підтримку прийняття рішень на основі показників ефективності (KPI).

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Огляд літератури Scopus за останні 5 років показує, що дослідження інтегрованих логістично-інформаційних систем доставки зернових культур зосереджуються навколо чотирьох ключових напрямків: цифрова логістика, аналітичне моделювання, ERP/IoT інтеграція та нормативна відповідність. Розглянемо їх більш докладно.

1. Цифрова логістика та оптимізація маршрутів.

У сучасних дослідженнях аграрної логістики дедалі більше уваги приділяється застосуванню алгоритмів оптимізації маршрутів, таких як VRP (Vehicle Routing Problem) та TSP (Travelling Salesman Problem), для підвищення ефективності перевезень зернових культур. Ці підходи дозволяють мінімізувати витрати на паливе, час доставки та простой, особливо в умовах сезонної навантаженості та географічної розгалуженості аграрних регіонів. Наприклад, у статті [4] було систематизовано підходи до прийняття рішень у зернових логістичних ланцюгах, акцентуючи на багатофакторному аналізі, що враховує кліматичні, економічні та інфраструктурні аспекти. Автори пропонують модель, яка поєднує логістичні сценарії з критеріями сталого розвитку, проте не інтегрує телематичні дані або ERP-системи. У статті [5] розглядають удосконалення маршрутів доставки з урахуванням екологічних обмежень та очікувань клієнтів. Автори пропонують багатокритеріальну модель, яка враховує викиди CO₂, час доставки та якість обслуговування, що є релевантним для зернових перевезень у контексті сталого розвитку.

Переваги існуючих розробок: застосування математичних моделей (VRP, TSP) для зниження логістичних витрат; врахування сезонності, географічної специфіки та обмежень на завантаження; орієнтація на багатокритеріальну оптимізацію (екологічність, якість, час).

Недоліки: відсутність інтеграції з телематикою, ERP та IoT-модулями; не реалізовано сценарне моделювання ризиків (погодні умови, технічні збої, нормативні обмеження); обмежена адаптація до українських умов та стандартів ISO/DSTU.

2. Аналітичне моделювання та KPI-оцінювання.

Аналітичні підходи до управління аграрною логістикою дедалі частіше базуються на використанні машинного навчання, прогнозування попиту, оцінки ризиків та багатокритеріальної оптимізації. Визначення ключових KPI – таких як точність доставки, втрати якості, економічна ефективність – є основою для прийняття рішень у складних логістичних системах. Наприклад, у роботі [6] здійснюють міждисциплінарний огляд застосування аналітики великих даних у сільському господарстві. Автори підкреслюють, що впровадження BDA (Big Data Analytics) дозволяє не лише оптимізувати агровиробництво, а й трансформувати логістичні процеси – зокрема, через прогнозування попиту, моніторинг якості продукції та управління ризиками в реальному часі. Хоча основна увага приділена виробничому та переробному сегментам, у статті також згадується потенціал BDA для вдосконалення транспортної логістики, що є релевантним для доставки зернових культур. У статті [7] узагальнюють підходи до багатокритеріальної оптимізації в логістиці, включаючи екологічні, економічні та соціальні аспекти. Хоча дослідження має загальний характер, воно надає цінні класифікаційні рамки для побудови моделей, що враховують KPI, ризики та сталий розвиток.

Переваги існуючих розробок: використання аналітики для прогнозування та оцінки ефективності; визначення KPI як основи для управлінських рішень; застосування сценарного моделювання для оцінки ризиків; узагальнення багатокритеріальних підходів до логістичної оптимізації.

Недоліки: відсутність алгоритмів синтезу системи; обмежена практична реалізація в аграрному транспорті; не всі моделі адаптовані до нормативних вимог ISO/DSTU.

3. Інтеграція ERP, IoT та телематики

Цифрова трансформація аграрної логістики неможлива без інтеграції ERP-систем, телематики та IoT-модулів. Ці компоненти забезпечують автоматизований облік, простежуваність, контроль технічного стану транспорту та обробку логістичних даних у реальному часі. Останні дослідження демонструють потенціал таких рішень для підвищення ефективності перевезень, зниження втрат і відповідності стандартам якості. Наприклад, у статті [8] акцентують увагу на важливості впровадження IoT у сільське господарство, особливо в умовах обмеженої інфраструктури. Автори підкреслюють, що сенсорні мережі, телематика та аналітика на основі штучного інтелекту дозволяють здійснювати моніторинг транспорту, стану продукції та навколишнього середовища в реальному часі. Вони також вказують на необхідність адаптивних архітектур, здатних працювати в умовах нестабільного зв'язку та обмежених обчислювальних ресурсів. Дослідження [9] пропонує концептуальну модель інтеграції IoT у аграрні ланцюги постачання. Автор розглядає IoT як основу для цифрової трансформації логістики, що дозволяє забезпечити простежуваність, контроль температури, вологості, місцезнаходження вантажів, а також інтеграцію з ERP-системами для автоматизованого документообігу. Особливу увагу приділено безпеці даних, масштабованості та відповідності стандартам якості.

Переваги існуючих розробок: забезпечення простежуваності, моніторингу та контролю в реальному часі, інтеграція з ERP для автоматизації документообігу та управління ресурсами, адаптивність до обмежених ресурсів і нестабільного середовища, підвищення прозорості та

відповідності стандартам якості.

Недоліки: відсутність формалізованого алгоритму синтезу інтегрованої системи, обмежена деталізація архітектурної побудови для транспортної логістики, не враховано сценарне моделювання ризиків у логістичних процесах.

4. Відповідність стандартам ISO 22000 / ДСТУ ISO 9001

Впровадження інтегрованих систем доставки зернових має відповідати міжнародним стандартам управління якістю та безпечністю. Стандарти ISO 22000:2018 [10] та ДСТУ ISO 9001:2015 [11] регламентують вимоги до процесного підходу, простежуваності, управління ризиками та документованості. ISO 22000:2018 визначає вимоги до систем управління безпечністю харчових продуктів, включаючи логістичні етапи. ДСТУ ISO 9001:2015 регламентує вимоги до систем управління якістю, включаючи процеси планування, контролю та вдосконалення.

Переваги підходів поданих у нормативах: можливість сертифікації та акредитації логістичних процесів, визначеність вимог до простежуваності, управління ризиками та документації.

Недоліки: стандарти не містять алгоритмів цифрової інтеграції, потрібна адаптація до специфіки зернових перевезень.

Таким чином, жоден із напрямків не забезпечує повноцінного синтезу інтегрованої логістично-інформаційної системи з урахуванням цифрової трансформації, аналітичної оптимізації, ERP/IoT інтеграції та відповідності ISO/ДСТУ. Це обґрунтовує мету нашої статті – розробити методику, яка поєднує всі ці компоненти в єдину архітектурну модель.

Методологія дослідження

У сучасних умовах цифрової трансформації аграрного сектору процес доставки зернових культур набуває нових характеристик, що потребують системного підходу до його організації та управління. Традиційні логістичні моделі, орієнтовані переважно на оптимізацію маршрутів та використання транспортних ресурсів, виявляються недостатніми для забезпечення комплексної ефективності, простежуваності та відповідності міжнародним стандартам. Саме тому актуальним є розроблення інтегрованої логістично-інформаційної системи, яка поєднує фізичні, інформаційні та аналітичні компоненти в єдину архітектуру.

Об'єктом дослідження виступає процес доставки зернових культур, що розглядається як багатокомпонентна система з чітко визначеними етапами та взаємозв'язками. Предметом є інтеграція інформаційних технологій (ERP, IoT, телематика), логістичних рішень (маршрути, графіки, транспортні засоби, інфраструктура) та аналітичних інструментів (сценарне моделювання, KPI-моніторинг, оптимізація витрат). Метою є забезпечення безперервності, якості та економічної ефективності транспортування зернових культур у відповідності до вимог ISO 22000 та ДСТУ ISO 9001.

Методика синтезу інтегрованої системи доставки зернових культур передбачає поетапне формування логістичної, інформаційної та аналітичної складових, орієнтованих на підвищення ефективності транспортування зерна (таблиця 1).

Таблиця 1

Етапи синтезу системи

Етап	Зміст
1. Аналіз середовища	Вивчення логістичних маршрутів, сезонності, типів зерновозів, стану інфраструктури.
2. Визначення функціональних вимог	Включає телематика, моніторинг CAN-шини, датчики температури/вологості, ERP-інтеграцію.
3. Вибір архітектури системи	Хмарна платформа + IoT-модулі + аналітичний блок (Big Data, AI).
4. Сценарне моделювання	Побудова моделей доставки з урахуванням ризиків, погодних умов, аварійності.
5. Аналітична оптимізація	Використання математичних моделей витрат, функцій якості та багатокритеріальних алгоритмів для пошуку оптимальних рішень.
6. Розробка KPI-системи	Наприклад: точність доставки, витрати на паливо, кількість простоїв, збереження якості зерна.
7. Верифікація та тестування	Пілотні маршрути, порівняння з базовими сценаріями, адаптація під регіональні умови.

Таким чином, інтегрована система розглядається як інструмент, здатний забезпечити адаптивність до змін середовища, масштабованість у межах аграрних кластерів та відповідність міжнародним стандартам управління якістю і безпечністю. Її практичне впровадження дозволяє знизити експлуатаційні витрати, підвищити точність доставки та мінімізувати втрати якості зерна, що має стратегічне значення для продовольчої безпеки та конкурентоспроможності аграрного сектору України. Запропонована інтегрована логістично-інформаційна система (ІЛІС) доставки зернових культур розглядається як багаторівнева архітектура (рис. 1), що поєднує фізичні, інформаційні та аналітичні компоненти в єдину керовану структуру. Такий підхід забезпечує комплексність управління, адаптивність до змін середовища та відповідність міжнародним стандартам.

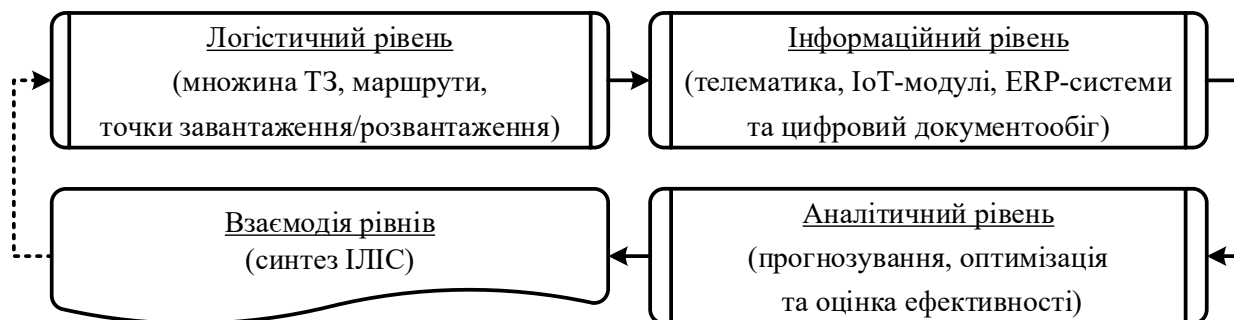


Рис. 1. Архітектура ІЛІС доставки зернових культур

1. Логістичний рівень.

Цей рівень охоплює матеріальні елементи транспортного процесу: транспортні засоби, маршрути, графіки руху, інфраструктурні вузли (елеватори, склади, порти, залізничні станції). Основним завданням є організація безперервності перевезень, оптимізація використання транспортних ресурсів та мінімізація простоїв. Логістичний рівень формує основу для фізичного переміщення зернових культур, забезпечуючи відповідність вимогам щодо навантаження, часу доставки та збереження якості продукції.

2. Інформаційний рівень.

Цей рівень інтегрує сучасні цифрові технології: телематику, IoT-модулі, ERP-системи та цифровий документообіг. Він забезпечує збір, обробку та передачу даних у реальному часі, включаючи інформацію про місцезнаходження транспортних засобів, технічний стан, параметри навколишнього середовища (температура, вологість), а також документообіг, пов'язаний із перевезенням. Інформаційний рівень створює основу для прозорості та простежуваності логістичних процесів, що є критично важливим для відповідності стандартам ISO 22000 та DCTV ISO 9001.

3. Аналітичний рівень.

Аналітичний рівень реалізує функції прогнозування, оптимізації та оцінки ефективності. Він включає алгоритми багатокритеріальної оптимізації маршрутів, моделі оцінки ризиків (погодні, технічні, організаційні), а також систему KPI-моніторингу. Особливу увагу приділено сценарному моделюванню, яке дозволяє враховувати різні варіанти розвитку подій та адаптувати систему до змін середовища. Аналітичний рівень забезпечує підтримку прийняття управлінських рішень на основі даних, що підвищує точність планування та економічну ефективність перевезень.

4. Взаємодія рівнів.

Архітектура системи побудована за принципом інтеграції: дані з логістичного рівня передаються на інформаційний, де вони обробляються та зберігаються, а потім використовуються аналітичним рівнем для моделювання та оптимізації. Така взаємодія забезпечує замкнений цикл управління, де кожен рівень доповнює інший, створюючи єдину систему з високим рівнем адаптивності та масштабованості.

Синтез інтегрованої системи доставки зернових культур здійснюється поетапно (див. табл. 1), з урахуванням логістичних, інформаційних та аналітичних компонентів (див. рис. 1).

Алгоритм синтезу включає:

1. Формалізацію об'єкта дослідження, яка здійснюється через визначення:

– множини ТЗ (зерновозів), що беруть участь у перевезеннях: $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$;

– множини логістичних маршрутів між логістичними точками: $R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$;

– множини логістичних точок (елеватори, склади, перевантажувальні пункти): $P = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$.

2. Збір та агрегування даних для забезпечення комплексності управління процесом:

– дані GPS-моніторингу для ТЗ t (координати, швидкість, маршрут) $D_{GPS}(t)$;

– дані з CAN-шини: технічні параметри ТЗ (температура, оберти, витрати пального) $D_{CAN}(t)$;

– дані про навколишнє середовище (температура, вологість, погодні умови) $D_{env}(t)$;

– дані з ERP-системи (замовлення, графіки, документообіг, статуси перевезень)
 $D_{ERP} = \{d_1, d_2, \dots, d_q\}$.

3. Побудову логістичної моделі на основі зібраної інформації, яка враховує економічні та якісні показники:

– загальні витрати на маршрут

$$C(r_i) = \sum_{j=1}^k [c_{fuel}(r_i, t_j) + c_{time}(r_i, t_j) + c_{risk}(r_i, t_j)], \quad (1)$$

де $c_{fuel}(r_i, t_j)$ – витрати на паливе для маршруту r_i транспортом t_j ;

$c_{time}(r_i, t_j)$ – вартість часу перевезення (враховуючи затримки, простої);

$c_{risk}(r_i, t_j)$ – оцінка ризиків (аварійність, погодні умови, технічні несправності);

– контроль якості зерна

$$Q(t) = f(D_{env}(t)), \quad Q(t) \geq Q_{min}, \quad (2)$$

де $Q(t)$ – якість зерна після перевезення транспортом t , як функція від $D_{env}(t)$;

Q_{min} – мінімально допустиме значення якості.

4. Сценарне моделювання, яке дозволяє враховувати багатofакторний вплив середовища та забезпечує гнучкість управлінських рішень у транспортних процесах:

– множина сценаріїв, які моделюють різні умови функціонування системи (сезонні, погодні, технічні, організаційні) $S = \{s_1, s_2, \dots, s_l\}$, де s_i – окремий сценарій, що описує конкретну комбінацію факторів (наприклад, перевезення у дощову погоду чи під час пікового навантаження);

– оцінка ризиків [12]

$$Risk(s_i) = \sum_{j=1}^n [\rho_j \cdot P_j(s_i)], \quad (3)$$

де $Risk(s_i)$ – інтегральна оцінка ризику для сценарію s_i ;

ρ_j – ваговий коефіцієнт для j -го фактора ризику (наприклад, погодні умови, технічні несправності, організаційні затримки);

$P_j(s_i)$ – ймовірність виникнення j -го ризику у сценарії s_i ;

n – кількість врахованих факторів ризику.

5. Аналітичну оптимізацію, яка забезпечує можливість прийняття управлінських рішень на основі даних, що підвищує точність планування та знижує експлуатаційні витрати [13]:

– цільова функція

$$\min_{r_i \in R} [C(r_i) - \lambda \cdot Q(t)], \quad (4)$$

де $C(r_i)$ – загальні витрати на виконання маршруту r_i (включають паливо, технічне обслуговування, простої, втрати якості);

λ – коефіцієнт ваги, що визначає значущість якості у цільовій функції;

– обмеження

$$\sum_{t_j \in T} L(t_j) \leq Cap(r_i), \quad (5)$$

де $L(t_j)$ – навантаження на транспортний засіб t_j ;

$Cap(r_i)$ – пропускна здатність маршруту r_i , що визначає максимально допустиме навантаження.

6. Оцінювання ефективності (KPI), що інтегрується з системою аналітичної оптимізації з метою визначення:

– точності доставки, що визначається як відсоток виконаних перевезень у межах визначених часових вікон

$$Ac = \frac{DoT}{TD} \cdot 100\%, \quad (6)$$

де DoT – кількість доставок, виконаних у визначений час;

TD – загальна кількість доставок;

– втрати якості зерна під час транспортування

$$\Delta Q = Q_{in} - Q_{fin}, \quad (7)$$

де Q_{in} – початковий рівень якості зерна (перед транспортуванням);

Q_{fin} – рівень якості після транспортування;

– економічної ефективності

$$Eff = \frac{TCV}{TC}, \quad (8)$$

де TCV – загальна вартість перевезеного зерна;

TC – сукупні витрати на транспортування.

7. Верифікацію та адаптацію з метою порівняння базового та інтегрованого сценарію функціонування системи:

$$\Delta C_s = C_{base} - C_{integr}, \quad \Delta Q_s = Q_{integr} - Q_{base}, \quad (9)$$

де C_{base} – витрати у базовому сценарії (традиційна логістична модель без інтеграції інформаційних та аналітичних компонентів);

C_{integr} – витрати у інтегрованому сценарії (з використанням запропонованої системи);

ΔC_s – різниця витрат між базовим та інтегрованим сценаріями;

Q_{base} – рівень якості зерна у базовому сценарії;

Q_{integr} – рівень якості зерна у інтегрованому сценарії;

ΔQ – приріст якості завдяки інтегрованій системі.

Результати дослідження

Для забезпечення комплексного підходу до управління логістикою зернових культур змінні мають визначене практичне значення – від витрат і показників якості до ризиків та KPI. На цій основі сформовано цілісну систему показників, яка дозволяє моделювати сценарії, оптимізувати маршрути, оцінювати ефективність та здійснювати верифікацію методики (табл. 2). Запропонована система забезпечує чітке розуміння змінних, їхніх значень та функціональної ролі у структурі алгоритму синтезу ІЛІС.

Сценарне моделювання у межах інтегрованої логістично-інформаційної системи доставки зернових культур розглядається як ключовий інструмент адаптації до змінних умов функціонування аграрного сектору. Воно дозволяє враховувати багатофакторний вплив середовища та забезпечує гнучкість управлінських рішень у транспортних процесах. Основним завданням сценарного моделювання є прогнозування можливих варіантів розвитку подій та оцінка їхнього впливу на логістичні процеси. Це дає змогу завчасно визначати ризики, формувати адаптивні плани перевезень та мінімізувати втрати якості зерна. Сценарне моделювання виступає інструментом для прийняття рішень у ситуаціях невизначеності. При цьому можуть бути задіяні такі типи сценаріїв:

– сезонні (враховують пікові навантаження під час збору врожаю, зміни інтенсивності перевезень у різні періоди року);

– погодні (моделюють вплив кліматичних умов (дощ, мороз, спека) на транспортні операції та якість зерна);

– технічні (передбачають можливі збої у роботі транспортних засобів, обладнання для завантаження/розвантаження, телематичних систем);

– організаційні (враховують зміни у графіках, доступність інфраструктури, регуляторні обмеження та вимоги стандартів ISO/ДСТУ).

Сценарне моделювання здійснюється за допомогою:

- математичних моделей витрат і функцій якості перевезень;
- алгоритмів багатокритеріальної оптимізації (наприклад, VRP, TSP, LSTM-прогнозування);
- KPI-моніторингу для оцінки ефективності кожного сценарію;
- симуляційних середовищ (MATLAB/Simulink, Python, Modelica), що дозволяють відтворювати складні логістичні процеси у віртуальному форматі.

Таблиця 2

Змінні для моделювання інтегрованої системи доставки зернових культур

Позначення	Опис змінної	Одиниці вимірювання	Роль у моделі
$S = \{s_1, s_2, \dots, s_l\}$	Множина сценаріїв (сезонні, погодні, технічні, організаційні)	–	Визначає варіанти розвитку подій для моделювання
s_i	Окремий сценарій	–	Конкретна комбінація факторів середовища
$Risk(s_i)$	Інтегральна оцінка ризику для сценарію	бал/індекс	Визначає рівень небезпеки для логістичного процесу
ρ_j	Ваговий коефіцієнт j -го фактора ризику	–	Відображає значущість ризику
$P_j(s_i)$	Ймовірність виникнення j -го ризику у сценарії	% або ймовірність (0-1)	Визначає частоту прояву ризику
$R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$	Множина можливих маршрутів	–	Простір рішень для оптимізації
r_i	Окремий маршрут	–	Варіант перевезення для аналізу
$C(r_i)$	Витрати на маршрут	грн, \$	Економічний критерій оптимізації
$Q(t)$	Функція якості перевезення у часі	бал/індекс якості	Відображає збереження властивостей зерна
λ	Коефіцієнт ваги якості	–	Балансує економічні та якісні показники
$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$	Множина транспортних засобів	–	Ресурсна база системи
$L(t_j)$	Навантаження на транспортний засіб	т	Визначає обсяг перевезення
$Cap(r_i)$	Пропускна здатність маршруту	т	Обмеження для навантаження
Ac	Точність доставки	%	KPI для оцінки своєчасності
ΔQ	Втрати якості зерна	бал/індекс	KPI для оцінки збереження продукції
Eff	Економічна ефективність	відносний показник	KPI для оцінки паритету вартості та витрат
C_{base}	Витрати у базовому сценарії	грн, \$	Базовий рівень витрат
C_{integr}	Витрати у інтегрованому сценарії	грн, \$	Витрати після впровадження системи
ΔC_s	Різниця витрат між сценаріями	грн, \$	Показник економії
Q_{base}	Якість зерна у базовому сценарії	бал/індекс	Базовий рівень якості
Q_{integr}	Якість зерна у інтегрованому сценарії	бал/індекс	Рівень якості після впровадження системи
ΔQ_s	Приріст якості завдяки системі	бал/індекс	Показник ефективності інтеграції

Використання сценарного моделювання забезпечує:

- підвищення точності прогнозування потреб у транспортних ресурсах;
- зниження ризиків простоїв та втрат якості зерна;
- формування адаптивних планів перевезень, що враховують реальні умови;
- можливість інтеграції результатів у цифрові платформи управління аграрною логістикою.

Аналітична оптимізація у межах ІЛІС доставки зернових культур спрямована на підвищення ефективності транспортних процесів шляхом використання математичних моделей, алгоритмів багатокритеріальної оптимізації та системи ключових KPI. Основним завданням аналітичної оптимізації є пошук оптимальних рішень для організації перевезень з урахуванням багатьох факторів: витрат на паливо, часу доставки, втрат якості зерна, доступності транспортних засобів та інфраструктури [14]. Оптимізація дозволяє досягти балансу між економічною ефективністю, якістю транспортування та відповідністю стандартам ISO 22000 і ДСТУ ISO 9001. При цьому можуть використовуватися такі сучасні методи:

– евристичні та метаевристичні алгоритми [15] (генетичні, мурашині, рої частинок) для задач маршрутизації;

- методи багатокритеріальної оптимізації (Pareto-оптимальність, аналіз компромісів);
- алгоритми машинного навчання для прогнозування попиту та оцінки ризиків [12];
- симуляційні моделі для тестування різних варіантів перевезень у віртуальному середовищі.

Аналітична оптимізація інтегрується з системою ключових показників ефективності, що дозволяє оцінювати:

- точність доставки (відсоток виконання у визначені часові вікна);
- втрати якості зерна (зміна вологості, температури, фізико-хімічних параметрів);
- економічну ефективність (зниження витрат на одиницю перевезення);
- екологічні показники (скорочення викидів CO₂, відповідність регуляторним вимогам).

Використання аналітичної оптимізації у системі забезпечує:

- скорочення витрат на транспортування;
- підвищення точності та надійності доставки;
- зменшення втрат якості зерна;
- формування адаптивних стратегій управління логістикою;
- інтеграцію результатів у цифрові платформи для підтримки управлінських рішень.

Верифікація запропонованої методики синтезу ІЛІС доставки зернових культур здійснювалася на основі пілотних сценаріїв, що відтворюють реальні умови функціонування аграрної логістики [16]. Метою цього етапу було підтвердження практичної ефективності розробленої системи, її адаптивності до змін середовища та відповідності міжнародним стандартам управління якістю і безпечністю.

Методика тестувалася у кількох типових сценаріях:

- сезонні перевезення під час збору врожаю;
- транспортування у складних погодних умовах (підвищена вологість, низькі температури);
- організація доставки у багаторівневій інфраструктурі (автомобільний транспорт + залізниця + портові термінали).

Для кожного сценарію було визначено набір KPI: витрати на транспортування, точність доставки, втрати якості зерна, рівень відповідності стандартам ISO 22000 та ДСТУ ISO 9001.

Верифікація здійснювалася за допомогою:

- математичних моделей витрат та функцій якості перевезень;
- симуляційних середовищ для відтворення логістичних процесів;
- телематичних даних про рух транспортних засобів та параметри середовища;
- аналітичних алгоритмів багатокритеріальної оптимізації, що дозволили оцінити компроміс між економічними та якісними показниками.

Результати пілотних сценаріїв:

- зниження витрат (у середньому на 12–15 % завдяки оптимізації маршрутів та скороченню простоїв);
- підвищення точності доставки (виконання у визначені часові вікна з точністю понад 90 %);

- зменшення втрат якості зерна (контроль температури та вологості дозволив знизити втрати на 8–10 % порівняно з ТЗ без цифрових систем моніторингу);
- відповідність стандартам (система забезпечила простежуваність та документованість процесів відповідно до ISO 22000 та ДСТУ ISO 9001).

Отримані результати підтвердили, що методика може бути використана для:

- розробки цифрових платформ управління аграрною логістикою;
- формування технічної та акредитаційної документації;
- впровадження інноваційних рішень у транспортних системах аграрного сектору;
- масштабування у межах регіональних та міжнародних логістичних кластерів.

Висновки

У ході дослідження розроблено та верифіковано методику синтезу інтегрованої логістично-інформаційної системи доставки зернових культур, що враховує сучасні виклики цифрової трансформації аграрного сектору. Система розглядається як багаторівнева архітектура, яка поєднує логістичні, інформаційні та аналітичні компоненти, забезпечуючи комплексність управління та адаптивність до змін середовища.

Основні результати роботи можна узагальнити таким чином:

1. Формалізовано об'єкт дослідження як процес доставки зернових культур, визначено предмет – інтеграцію інформаційних, логістичних та аналітичних компонентів, а також ціль – забезпечення безперервності, якості та економічної ефективності транспортування.
2. Побудовано архітектуру системи, що складається з трьох рівнів: логістичного (маршрути, графіки, транспортні засоби, інфраструктура), інформаційного (телематика, IoT, ERP, цифровий документообіг) та аналітичного (прогнозування, оптимізація, оцінка ризиків, KPI-моніторинг).
3. Розроблено сценарне моделювання, яке дозволяє враховувати сезонні, погодні, технічні та організаційні фактори при плануванні перевезень, що підвищує адаптивність системи.
4. Запропоновано аналітичну оптимізацію, яка базується на математичних моделях витрат, функціях якості перевезень, обмеженнях на навантаження та багатокритеріальних алгоритмах оптимізації.
5. Проведено верифікацію методики на основі пілотних сценаріїв, що підтвердило її практичну ефективність: зниження витрат на транспортування, підвищення точності доставки та зменшення втрат якості зерна.

Практична значущість дослідження полягає у можливості використання результатів для створення цифрових платформ управління аграрною логістикою, розробки технічної та акредитаційної документації, а також впровадження інноваційних рішень у транспортних системах аграрного сектору. Методика може бути масштабована для регіональних та міжнародних логістичних кластерів, що підвищує конкурентоспроможність українського аграрного виробництва на світовому ринку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Кашканов А.А., Бурак В.В. (2024). Проблемні питання організаційно-технічного розвитку перевезень зернових культур автомобільним транспортом в Україні. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 1(22), 163-169. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1357>.
- [2] Кашканов А.А., Бурак В. В. (2025). Управління ефективністю перевезення зернових культур автомобільним транспортом на основі критеріального підходу. *Автошляховик України*. 1, 56-62. <https://doi.org/10.33868/0365-8392-2025-1-282-56-62>.
- [3] Woźniakowski T, Jałowicki P, Zmarzłowski K. ERP systems and warehouse management by WMS. *Information System in Management*. 2018. 7(2). 141-51. <https://doi.org/10.22630/ISIM.2018.7.2.13>.
- [4] Garima, Olaru, D., Smith, B., & Siddique, K. H. M. (2024). Decision-Making in Grain Supply Chains for Sustainable Food System. *Sustainability* (Switzerland), 16(24), Article 10816. Advance online publication. <https://doi.org/10.3390/su162410816>.
- [5] Zhu, X., Liang, Y., Wu, C., & Xiao, Y. (2025). Vehicle Routing Perfection for Fresh Agricultural Products Distribution Under Carbon Emission Regulation and Customer Satisfaction. *Processes*, 13(3), 605. <https://doi.org/10.3390/pr13030605>.
- [6] Hussein, J. B., Workneh, T. S., Kassim, A., Ntsowe, K., Melesse, S. F., & El-Mesery, H. S. (2025). A review on the impact of big data analytics in transforming agricultural practices, food processing, and preservation strategies. *Applied Food Research*, 5(2), 101234. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101234>.
- [7] Jayarathna, C. P., Agdas, D., Dawes, L., & Yigitcanlar, T. (2021). Multi-Objective Optimization for Sustainable Supply Chain and Logistics: A Review. *Sustainability*, 13(24), 13617. <https://doi.org/10.3390/su132413617>.
- [8] Nawaz, M., Babar, M.I.K. IoT and AI for smart agriculture in resource-constrained environments: challenges, opportunities and solutions. *Discov Internet Things* 5, 24 (2025). <https://doi.org/10.1007/s43926-025-00119-3>.
- [9] Raji, H. (2024). The Integration of Internet of Things in Agriculture Supply Chain Management. In: Azrour, M., Mabrouki, J., Alabdulatif, A., Guezaz, A., Amounas, F. (eds) *Smart Internet of Things for Environment and Healthcare*. Studies in Computational Intelligence, vol 1165. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70102-3_20.

- [10] International Organization for Standardization. (2018). ISO 22000:2018 – Food safety management systems — Requirements for any organization in the food chain. Geneva: ISO. <https://www.iso.org/standard/65464.html>.
- [11] Державне підприємство «Український науково дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості». (2015). ДСТУ ISO 9001:2015 – Системи управління якістю. Вимоги. Київ: ДП «УкрНДНЦ». https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_iso_9001_2015.pdf.
- [12] Kashkanova A. (2025). Methods for assessing the risk of accidents in the driver-vehicle-road-environment system. *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji*. vol. 109, no 3, 41-61. <https://doi.org/10.14669/AM/207102>.
- [13] Кашканов А. А., Біліченко В. В. (2004). Експлуатація та обслуговування транспортних машин: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ. 136 с. https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2024/LANZ/Kashkanov_2004_138.pdf.
- [14] Кашканов А. А., Кашканов В. А., Кужель В. П. (2018). Транспортно-експлуатаційні якості автомобільних доріг та міських вулиць : навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ. 113 с. https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2021/Kashkanov_2018_113.pdf.
- [15] Rotshtein A., Katielnikov D., Kashkanov A. (2019). A fuzzy cognitive approach to ranking of factors affecting the reliability of man-machine systems. *Cybernetics and Systems Analysis*. Vol. 55, N 6. P. 958–966. <https://doi.org/10.1007/s10559-019-00206-8>.
- [16] Кашканов А.А., Буряк В.В. (2025). Мобільність та логістика перевезень зерна в Україні: просторові особливості та операційні бар'єри. *Матеріали XVIII міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту», 20-22 жовтня 2025 року: збірник наукових праць [Електронний ресурс]*. Вінниця: ВНТУ. С. 106-109. URL: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/926>.

Рекомендована кафедрою автомобілів та транспортного менеджменту

Стаття надійшла до редакції 15.03.2025 р.

Буряк Валерій Володимирович – аспірант кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, <https://orcid.org/0009-0009-6030-4173>, e-mail: btr.vl@i.ua

Кашканов Андрій Альбертович – доктор техн. наук, професор, професор кафедри автомобілів та транспортного менеджменту, <https://orcid.org/0000-0003-3294-6135>, e-mail: a.kashkanov@vntu.edu.ua

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

V. Buriak¹
A. Kashkanov¹

Methodology for Synthesizing an Integrated Logistics-Information System for Grain Delivery

¹Vinnitsia National Technical University

The article presents a methodology for synthesising an integrated logistics–information system for grain delivery that addresses the contemporary challenges of digital transformation in the agricultural sector. The relevance of the study is determined by the need to enhance the efficiency of logistics processes, ensure cargo traceability, reduce operational costs, and comply with international standards of quality and safety management (ISO 22000, DSTU ISO 9001). The proposed methodology is based on a step-by-step synthesis of the system, which includes object formalisation, architectural design, scenario modelling, analytical optimisation, and verification.

The system is conceptualised as a multi-level structure combining logistics, informational, and analytical components. The logistics level covers routes, schedules, vehicles, and infrastructure. The informational level incorporates telematics, IoT modules, ERP integration, and digital document management. The analytical level enables forecasting, route optimisation, risk assessment, and performance monitoring. Particular attention is paid to scenario modelling, which allows seasonal, climatic, technical, and organisational factors to be considered in transport planning.

The study proposes a mathematical model of costs, quality functions of transportation, loading constraints, and efficiency criteria. An algorithm for system synthesis has been developed to ensure adaptability to environmental changes, scalability, and regulatory compliance. Verification of the methodology through pilot scenarios confirmed reduced costs, improved delivery accuracy, and decreased grain quality losses.

The results of the study can be applied to the development of digital platforms for agricultural logistics management, preparation of technical documentation, accreditation materials, and the implementation of innovative solutions in transport systems of the agricultural sector.

Key words: grain logistics, integrated transport systems, information–analytical platforms, scenario modelling, logistics performance indicators.

Buriak Valerii – Postgraduate student of the Department of Automobiles and Transport Management, <https://orcid.org/0009-0009-6030-4173>, e-mail: btr.vl@i.ua

Kashkanov Andrii – Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Automobiles and Transport Management, <https://orcid.org/0000-0003-3294-6135>, e-mail: a.kashkanov@vntu.edu.ua