

УДК 004.89:631.372

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-17>

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТРАНСПОРТУВАННЯ ЗЕРНА ПІД ЧАС МАРШРУТИЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНОГО МАРШРУТУ ЕЛЕВАТОРА

Тимчук Сергій Олександрович,

доктор технічних наук, доцент,
професор кафедри інформаційних технологій
Сумського державного університету
ORCID ID: 0000-0002-8600-4234

Мардзявко Віталій Анатолійович,

асистент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки
Миколаївського національного аграрного університету
ORCID ID: 0000-0001-7327-9215

Руденко Андрій Юрійович,

асистент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки
Миколаївського національного аграрного університету
ORCID ID: 0000-0002-5103-6412

У статті розглядається проблема механічного травмування зерна в процесі транспортування в межах елеваторного комплексу. Основну увагу приділено впливу конструктивних особливостей і режимів роботи транспортного обладнання на якість зерна. Запропоновано математичну модель мінімізації пошкоджень, яка базується на динамічному виборі оптимального маршруту транспортування з урахуванням технічного стану обладнання та коефіцієнтів бою зерна.

Розроблено логічну структуру управління на базі SCADA та ПЛК, яка адаптується до змін у режимі реального часу. Упровадження запропонованого алгоритму вибору маршруту транспортування за критерієм мінімізації бою зерна дало змогу знизити рівень пошкодження зернової маси, зберегти її посівні та технологічні властивості. Модель урахує технічний стан кожного вузла, ступінь зносу, навантаження та швидкісні режими, що дає змогу формувати найменш шкідливі маршрути транспортування у динамічному режимі. Розроблена система логічних рівнянь забезпечує безпечну активацію елементів маршруту лише за умови їх готовності та справності.

Наукова новизна полягає у розробленні інтегрованого алгоритму вибору маршруту транспортування зерна, що враховує мінімізацію механічного пошкодження як оптимізаційний критерій. Представлено логічні рівняння для керування маршрутом транспортування, які враховують технічний стан елементів, напрямок руху, перевантаження та швидкість, забезпечуючи динамічну адаптацію системи. Упровадження розробленого підходу дає змогу істотно підвищити якість транспортування зерна, особливо для підприєємств, орієнтованих на експорт.

Ключові слова: зерно, транспортування, елеватор, SCADA, ПЛК, алгоритм маршрутизації, мінімізація бою зерна, якість продукції.

Tymchuk Sergiy, Mardziavko Vitalii, Rudenko Andrii. Improving the quality of grain transportation during elevator transport route routing

The article considers the problem of mechanical injury to grain during transportation within the elevator complex. The main attention is paid to the influence of design features and operating modes of transport equipment on grain quality. A mathematical model of damage minimization is proposed, which is based on the dynamic selection of the optimal transportation route taking into account the technical condition of the equipment and grain battle coefficients.

A logical control structure based on SCADA and PLC has been developed, which adapts to changes in real time. The implementation of the proposed algorithm for selecting a transportation route based on the criterion of minimizing grain battle has allowed to reduce the level of damage to the grain mass, preserve its sowing and technological properties. The model takes into account the technical condition of each node, the degree of wear, load and speed modes, which allows to form the least harmful transportation routes in a dynamic mode. The developed system of logical equations ensures safe activation of route elements only if they are ready and in good condition.

The scientific novelty consists in the development of an integrated algorithm for selecting a grain transportation route, which takes into account the minimization of mechanical damage as an optimization criterion. Logical equations for controlling the transportation route are presented, which take into account the technical condition of the elements, the direction of movement, overload and speed, ensuring dynamic adaptation of the system. The implementation

of the developed approach allows to significantly improve the quality of grain transportation, especially for export-oriented enterprises.

Keywords: grain, transportation, elevator, SCADA, PLC, routing algorithm, grain damage minimization, product quality.

Вступ. Зі зростанням значення сучасного зернового ринку все більш актуальним стає питання забезпечення належного зберігання зерна та ефективної організації логістичних процесів. Це зумовлює необхідність подальшого розвитку елеваторної галузі. За останні роки елеваторні комплекси істотно модернізувались як у сфері управління, так і в технічному оснащенні, що дало змогу значно поліпшити якість обробки зерна. Однак у технологічному прогресі зберігаються чинники, що впливають на якість і продуктивність. До них можна віднести пошкодження зерна під час транспортування по елеватору та завантаження у сховища.

У процесі промислової обробки зерна на елеваторних лініях неминуче виникає його травмування, оскільки під час транспортування зерно проходить через різноманітні механізми (транспортери, самопливні та приймальні пристрої, бункери, норії тощо) й контактує з металевими поверхнями та рухомими частинами обладнання. Це призводить до пошкодження як зовнішньої оболонки, так і внутрішньої структури зерна. Навіть якщо зовнішні ознаки ушкоджень непомітні, це не свідчить про їх відсутність. Часто травмування відбувається на мікрорівні, що негативно впливає на якість зерна, особливо якщо йдеться про посівний матеріал. Таким чином, механічний вплив ударів, тертя та стискаючих навантажень, що спричиняють як мікро-, так і макропошкодження, повністю уникнути неможливо, його можна тільки зменшити.

На рис. 1 можна побачити залежність рівня ушкоджень зерна від кількості механізмів, через які воно проходить. Як видно, зі збільшенням кількості механізмів ушкодження зростають

нелінійно, що підкреслює важливість мінімізації кількості механічних впливів у технологічному процесі.

Отже, зменшення рівня травмування зерна під час транспортування є вкрай важливим, оскільки пошкоджені зерна неможливо повністю вилучити з основної маси, саме тому є актуальним питання впровадження відповідних умов для підвищення якості транспортування зерна в елеваторному комплексі.

Аналіз експлуатації елеваторного обладнання свідчить, що найбільших пошкоджень зерно зазнає під час транспортування ковшовими норіями [1; 2]. Однією з основних причин травмування є явище так званого «зворотного висипання», коли частина зерна не потрапляє у вивантажувальний патрубок, а осипається назад у черевик [3]. Це не лише призводить до повторного підйому продукту та зайвих витрат енергії, а й стає джерелом значної частки пошкоджень – близько 30 % від усіх травм, які виникають під час транспортування зерна по норії [4; 5].

Для вирішення цієї проблеми недостатньо лише змінювати конструкцію ковшових норій, адже це не завжди дає очікуваний ефект. Значно ефективнішим підходом вважається оптимізація швидкісного режиму роботи. Зменшення швидкості руху стрічки дає змогу знизити інтенсивність механічного впливу та мінімізувати ефект зворотного висипання [6]. Проте цей підхід має і свої недоліки: для забезпечення ефективної роботи повільнохідних систем потрібні потужніші тягові механізми та двигуни, що суттєво впливає на енергоспоживання. Окрім того, надмірне зниження швидкості призводить до

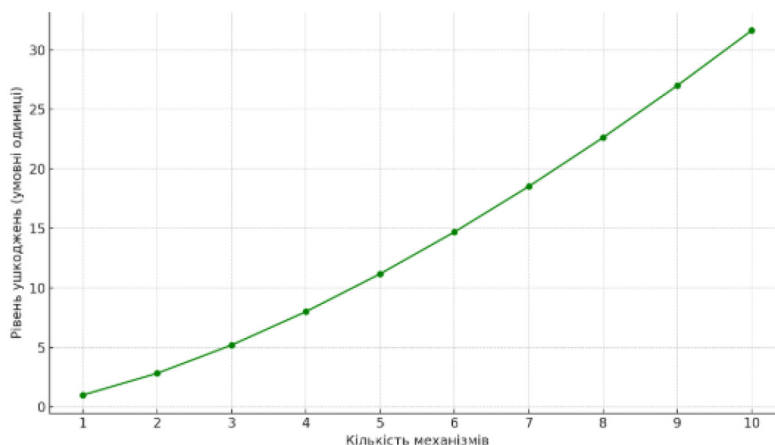


Рис. 1. Залежність рівня ушкодження зерна від кількості механізмів

зменшення загальної продуктивності елеватора, що також є небажаним, тому доцільним залишається впровадження автоматичного способу визначення оптимального маршруту за критерієм мінімізації приросту бою зерна під час транспортування.

Метою роботи є створення математичної моделі та обґрунтування алгоритму для мінімізації механічного пошкодження зерна під час транспортування в елеваторному комплексі шляхом оптимізації маршруту транспортування.

Результати. Як уже зазначалося в роботах [7–9], усередині елеваторного комплексу переміщення зернової маси здійснюється за допомогою технологічних маршрутів, які забезпечують ефективне виконання всіх необхідних операцій із використанням наявного обладнання, систем механізації та автоматизації. Основною метою є досягнення максимальної ефективності за мінімальних витрат праці й ресурсів. Практично кожна операція передбачає налаштування або формування маршруту переміщення зерна у заданому напрямку з використанням конкретних механізмів, визначених заздалегідь.

За реалізацію цієї функції у складі автоматизованої системи управління відповідає система SCADA. Однак для того щоб вона могла створити маршрут, необхідно запрограмувати всі керуючі пристрої: норії, транспортери, засувки, клапани та силоси, а також передбачити всі можливі варіанти маршрутів. Система вибирає оптимальний маршрут залежно від координат початкової (точка А) та кінцевої (точка В) точок.

Під час програмування маршрутів транспортування зерна в елеваторному комплексі обов'язково враховуються кілька ключових вимог: недопущення змішування різних партій зерна, які одночасно переміщуються за окремими маршрутами (адже система може одночасно підтримувати до 6–7 незалежних маршрутів); послідовне ввімкнення обладнання у зворотному напрямку – від кінцевої точки маршруту до початкової з подальшим вимкненням у зворотному порядку; а також забезпечення стабільної роботи всіх механізмів маршруту і наявності оперативної системи сповіщення про будь-які збої чи несправності. Правильне налаштування маршрутів є ключем до максимальної ефективності елеватора: зменшується час простою, оптимізується завантаження норій, двигунів та іншого обладнання, що, своєю чергою, позитивно впливає на енергоефективність і добову продуктивність комплексу. Таким чином, ми бачимо, що зазначені вимоги забезпечують показники економічності, ефективності та продуктивності, нехтуючи при

цьому показниками якості продукції наприкінці транспортування.

Метод вибору оптимального маршруту транспортування зерна з урахуванням мінімізації його пошкоджень можна представити через взаємодію двох рівнів автоматизації: системи SCADA та програмованого логічного контролера (ПЛК).

На першому етапі система SCADA здійснює аналіз поточного стану технологічного обладнання. Зчитуються дані про доступність елементів маршруту, їхній технічний стан, навантаження, швидкість роботи і ступінь зносу. На основі цих даних для кожного елемента транспортного маршруту визначається коефіцієнт бою зерна, який характеризує ризик механічного пошкодження зерна під час його проходження через цей елемент.

Після збору даних SCADA формує множину всіх можливих маршрутів транспортування зерна, де для кожного маршруту обчислюється сумарний показник пошкодження зерна $C_6(R_i)$.

Після вибору оптимального маршруту R_{opt} SCADA передає ПЛК список активних елементів маршруту та послідовність їх запуску. Запуск відбувається у правильній технологічній послідовності – від кінцевої точки маршруту до початкової. Це гарантує, що на момент подачі зерна приймальні елементи (силоси, клапани) вже готові до прийому продукції.

ПЛК здійснює включення кожного елемента маршруту лише після підтвердження його технічної готовності за допомогою зворотних сигналів стану (контроль живлення, відсутність перевантаження, правильний напрямок руху).

Під час транспортування система SCADA та ПЛК постійно контролюють стан обладнання: температуру двигунів, навантаження на механізми, справність сенсорів. Якщо виявлено несправність або відхилення від нормальної роботи (наприклад, перегрів транспортеру або перевантаження норії), система негайно проводить перебудову маршруту. SCADA виключає несправний елемент із можливих варіантів і повторно обчислює новий оптимальний маршрут за критерієм мінімізації бою зерна, після чого ПЛК адаптує нову послідовність запуску.

Система автоматизації на базі SCADA і ПЛК забезпечить не лише ефективність транспортування зерна, а й гарантує його максимальну якість за рахунок мінімізації механічних ушкоджень протягом усього процесу переміщення. Завдяки динамічному переобчисленню маршрутів у реальному часі система зберігає високу гнучкість і надійність навіть за умов несправностей обладнання.

Таким чином, ПЛК відіграє ключову роль у системі автоматизації елеваторного комплексу, реалізуючи алгоритм управління, побудований на основі логічних рівнянь, які генерують точні керуючі сигнали для виконавчих механізмів, що дає змогу сформулювати транспортний маршрут [8; 10]:

1) транспортні вузли технологічного процесу керуються відповідно до такого набору команд логічних рівнянь:

$$\begin{cases} Y1 = X7 \& X6 \& X5 \& X3 \& (X1 \& X2 \& X4 + \\ + \overline{X1} + X1 \& \overline{X2}) \\ Y2 = X7 \& X6 \& X5 \& \overline{X3} \& (X1 \& X2 \& X4 + \\ + \overline{X1} + X1 \& \overline{X2}) \end{cases}; \quad (1)$$

2) направляючі елементи технологічного процесу визначаються відповідною системою рівнянь:

$$\begin{cases} Y1 = X1 \& X2 \& X3 \& X4 \& X5 \& X6; \\ Y2 = X1 \& \overline{X2} \& X3 \& X4 \& X5 \& X6; \end{cases} \quad (2)$$

3) для елементів розвантаження керуючі команди поділяються на дві системи логічних рівнянь:

– команди руху візка:

$$\begin{cases} Y1 = \overline{X1} \& X2 \& X3 \& X4 \& X5 \& X6; \\ Y2 = \overline{X1} \& \overline{X2} \& X3 \& X4 \& X5 \& X6; \end{cases} \quad (3)$$

– команди руху клапанів:

$$\begin{cases} Y1 = \overline{X1} \& X2 \& X3 \& X4 \& X5 \& X6; \\ Y2 = X1 \& X2 \& X3 \& X4 \& X5 \& X6; \end{cases} \quad (4)$$

де X_n – відповідні варіанти команд (табл. 1).

Інтеграція критерію мінімізації пошкодження зерна у програмований логічний контролер автоматизованої системи має забезпечити можливість визначення всіх доступних на поточний

Таблиця 1

Загальні вхідні сигнали (X_i)

X1	Контроль поточного стану об'єкта або положення (активність, позиція, відповідність номеру силосу)
X2	Заданий напрямок руху або напрямок повороту
X3	Контроль фактичного руху або контроль позиції механізму
X4	Контроль швидкості руху або контроль підпору
X5	Наявність живлення для механізму
X6	Контроль перевантаження механізму або крайня позиція/дозвіл на дію
X7	Готовність наступного пристрою до прийому зерна (для транспортерів, норій)

момент маршрутів транспортування зерна від початкової до кінцевої точки.

У роботах [11; 12] уже проведено опис оптимізаційного критерію $C_{6.min}$ (мін бою зерна), який розглядається як сума впливу елементів транспортного обладнання, клапанів і засувок технологічного маршруту:

$$C_{6.3.min} = K_{6.1}k_{ik} + (K_{6.11} + K_{6.12})k_{ik} + (K_{6.11} + K_{6.12} + K_{6.13}) \cdot k_{ik} + \dots + \sum K_{6.i.n+1}k_{ik}, \quad (5)$$

де K_{6i} – коефіцієнт впливу i -го елемента обладнання (норії, транспортери, клапани, засувки) на якість зерна (залежить від типу зерна, конструкції обладнання та швидкості роботи);

k_{ik} – коефіцієнт задіяності елемента (0 – використовується в маршруті, 1 – не використовується).

Опис даного критерію $C_{6.min}$ можливо на основі алгоритму прокладання маршруту транспортування (рис. 2).

Зі структури запропонованого алгоритму випливає, що вибір маршруту транспортування здійснюється від найменшого до найбільшого значення виходячи з підсумкового коефіцієнта

за ΣC_{6i} (від $min \rightarrow max$), при $t \rightarrow max$, $C_{e.min}$

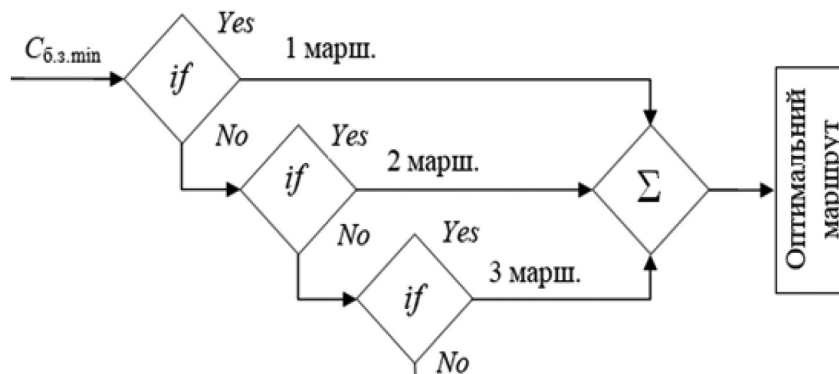


Рис. 2. Алгоритм вибору прокладання маршруту за критерієм $C_{6.min}$ зерна

впливу компонентів транспортної системи – транспортерів, клапанів і засувок – на стан зернової маси. Іншими словами, для переміщення зерна з точки А до точки Б система прагне зберегти максимальну якість продукції, перевіряючи усі доступні маршрути на предмет їх завантажності. За наявності вільного маршруту рішення про його використання приймається на основі мінімального коефіцієнта травмування зерна.

Реалізація побудови маршруту відповідно до критерію мінімізації бою зерна ($C_{\text{e.min}}$) створює додаткову умову для збереження якості зерна під час транспортування. Це досягається шляхом розроблення відповідного технічного завдання та оновлення керуючої програми маршрутизації. Такий підхід є особливо цінним для підприємств, орієнтованих на експорт, де якість зерна є ключовим критерієм для задоволення вимог міжнародних ринків. В окремих випадках саме правильний вибір маршруту транспортування може стати чинником, що дає змогу зберегти або навіть поліпшити якість продукції.

Алгоритм, представлений на рис. 2, можна описати математично виходячи із завдання мінімізації бою зерна під час вибору маршруту.

$$\min \sum K_{\text{ei}}, \quad (6)$$

за $C_{\text{e.min}} \rightarrow \min$ умови зменшення впливу процесу енергозбереження та збільшення часу транспортування $t \rightarrow \max$ для покращення якості зерна.

Умови вибору заданого алгоритму передбачають вибір між варіантами залежно від кількості доступних «вільних механізмів». На кожному етапі перевіряються такі умови:

- вибраний маршрут має бути доступним (усі елементи в робочому стані);
- система повинна враховувати стан обладнання в реальному часі.

Отже, зображення математичної моделі задачі мінімізації бою зерна під час вибору маршруту виглядає так:

1. Визначаємо структуру маршруту через позначення $\varepsilon = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ множини всіх можливих елементів обладнання, які можуть бути задіяні в маршруті транспортування.

Кожен елемент e_i характеризується коефіцієнтом бою зерна K_{ei} , який чисельно визначає ступінь впливу даного елемента на пошкодження зерна. Значення цього коефіцієнта належить інтервалу $[0, 1]$, де 0 – обладнання не впливає на зерно (абсолютно безпечно), 1 – максимальний негативний вплив (висока вірогідність бою).

Окрім того, кожен елемент маршруту має двійкову змінну k_i , яка позначає, чи включено цей елемент у поточний маршрут: $k_i = 1$ – елемент

використовується, $k_i = 0$ – елемент не використовується.

2. Формуємо цільову функцію як сумарний вплив усіх елементів маршруту на зерно:

$$C_{\text{e.min}} = \sum_{i=1}^n K_{\text{ei}} \cdot k_i. \quad (7)$$

Ця функція є оптимізаційним критерієм, вона дає змогу оцінити загальний рівень травмування зерна під час транспортування по конкретному маршруту. Метою системи є мінімізація цього значення.

3. Для кожного елемента e_i призначається коефіцієнт бою:

$$K_{\text{ei}} \in [0, 1]. \quad (8)$$

і бінарна змінна:

$$k_i \in \{0, 1\},$$

$$k_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо } e_i \text{ включено до маршруту} \\ 0, & \text{інакше} \end{cases} \quad (9)$$

4. Визначаємо умови обчислення, де:

- усі маршрути R_j мають бути доступними (вільними для транспортування).
- значення K_{ei} можуть бути функціями від швидкості руху, типу зерна, середнього навантаження на механізм:

$$K_{\text{ei}} = f(\text{швидкість, тип зерна, знос, частота запуску}). \quad (10)$$

Коефіцієнт бою зерна для кожного елемента може бути функцією реальних експлуатаційних параметрів:

$$K_{\text{ei}} = f(v_i, \sigma_i, t_i, z_i), \quad (11)$$

де v_i – швидкість руху транспортера/норії,

σ_i – навантаження на механізм,

t_i – час роботи,

z_i – ступінь зносу обладнання.

Таким чином, модель стає адаптивною й ураховує поточний стан механізмів елеватора.

5. Генерація множини маршрутів. Система автоматизації (наприклад, SCADA з ПЛК) генерує множину всіх можливих маршрутів транспортування:

$$R = \{R_1, R_2, \dots, R_m\}, \quad R_j \subseteq \varepsilon. \quad (12)$$

Для кожного маршруту R_j , що з'єднує задану початкову точку А з кінцевою точкою В, обчислюється показник впливу:

$$C_{\text{e}}(R_j) = \sum_{e_i \in R_j} K_{\text{ei}}. \quad (13)$$

6. Оптимізаційний вибір, де з множини можливих маршрутів вибирається той, для якого значення критерію $C_{\text{e}}(R_j)$ є найменшим:

$$R_{\text{опт}} = \arg \min_{R_j \in R} C_6(R_j). \quad (14)$$

Цей маршрут і буде використано для реального транспортування зерна з урахуванням мінімального рівня пошкодження.

Модель (7–14) дає змогу інтелектуально керувати процесом транспортування зерна, ураховуючи фізичні параметри обладнання, умови експлуатації та необхідну якість кінцевої продукції.

Після вибору маршруту $R_{\text{опт}}$ система управління видає керуючі сигнали на відповідні елементи обладнання (норії, транспортери, клапани), забезпечуючи:

- поетапне увімкнення механізмів у зворотному напрямку (від точки призначення до початку);
- контроль технічного стану кожного елемента;
- збереження якості зерна протягом усього маршруту.

На рис. 3 представлено блок-схему алгоритму вибору маршруту транспортування зерна за критерієм мінімального бою.

Ця схема відображає ключові етапи процесу – від введення даних до вибору оптимального маршруту і реалізації керування обладнанням.

Візуалізацію прикладної транспортної мережі для моделі мінімуму бою зерна представлено на рис. 4. Кожне ребро представляє можливий шлях з одного елемента обладнання до іншого, а цифри – це коефіцієнти бою зерна $K_{\text{бі}}$. Мета – знайти маршрут із найменшою сумою цих коефіцієнтів.

Граф маршруту транспортування зерна складається з вершин, що представляють окремі елементи обладнання або логістичні точки (наприклад, транспортери, норії, клапани), у нашому прикладі це A, B, C, D, E, F , а також із ребер, які показують можливі напрямки руху зерна між цими елементами. Кожне ребро має числове значення – коефіцієнт бою зерна $K_{\text{бі}} \in [0, 1]$, що визначає рівень пошкодження зерна під час транспортування на цій ділянці; наприклад, $A \rightarrow B$ має коефіцієнт 0,1, що є майже безпечним, тоді як $C \rightarrow E$ – 0,4, що вказує на значну шкоду. Для визначення найкращого маршруту система повинна згенерувати всі можливі шляхи від початкової точки A до кінцевої F , розрахувати сумарні коефіцієнти бою для кожного шляху, а потім вибрати маршрут із найменшим значенням – це й буде оптимальний варіант за критерієм мінімального бою зерна $C_{6.\text{min}}$.

Як приклад можна розглянути три можливі маршрути переміщення зерна між заданими



Рис. 3. Схема алгоритму вибору маршруту транспортування зерна за критерієм мінімального бою

точками. Кожен маршрут складається з певних елементів обладнання (норій, транспортерів, клапанів тощо), кожен з яких має власний коефіцієнт бою зерна $K_{\text{бі}}$. Після розрахунку сумарного впливу на зерно ми отримали відповідні коефіцієнти бою, що дасть можливість порівняти маршрути:

$$\begin{cases} R_1 = \{e_1, e_3, e_5\}, \\ K_{\text{бі}} = \{0, 3, 0, 4, 0, 1\} \Rightarrow C_6(R_1) = 0,8 \\ R_2 = \{e_2, e_4, e_6\}, \\ K_{\text{бі}} = \{0, 2, 0, 1, 0, 2\} \Rightarrow C_6(R_2) = 0,5 \\ R_3 = \{e_1, e_2, e_6\}, \\ K_{\text{бі}} = \{0, 3, 0, 2, 0, 2\} \Rightarrow C_6(R_3) = 0,7 \end{cases} \quad (15)$$

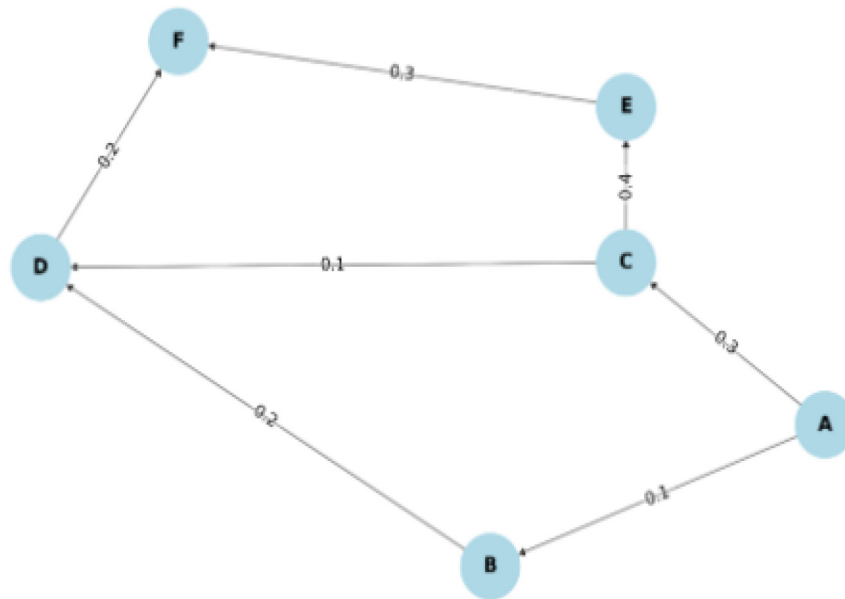


Рис. 4. Граф маршруту транспортування з коефіцієнтами бою зерна

Оскільки найменше значення коефіцієнта має маршрут R_2 , саме він вибирається як оптимальний:

$$R_{opt} = R_2 \text{ бо має найменший } C_6. \quad (16)$$

Це означає, що система активує маршрут R_2 для транспортування зерна, адже він забезпечує мінімальне пошкодження зернової маси під час переміщення.

Щоб реалізувати підхід мінімізації пошкодження зерна в автоматизованій системі елеватора на базі SCADA та ПЛК, потрібна система логічних рівнянь. Для цього використовується комбінація логічних входів (X_1-X_7), які відповідають за контроль стану обладнання, напрямку, швидкості, навантаження, живлення та готовності наступного елемента маршруту (згідно з табл. 1).

Увімкнення механізму транспортування (норії, транспортери) можливе лише тоді, коли всі вхідні умови задовольняються:

$$Y_1 = X_1 \wedge X_2 \wedge X_3 \wedge X_4 \wedge X_5 \wedge \neg X_6 \wedge X_7. \quad (17)$$

Тобто механізм активується лише за умови його технічної справності, правильного напрямку, наявності живлення, відсутності перевантаження та підтвердження, що наступний елемент маршруту готовий до прийому зерна.

Увімкнення приймального елемента (силос, клапан):

$$Y_2 = X_1 \wedge X_3 \wedge X_5 \wedge \neg X_6. \quad (18)$$

Це дає змогу контролювати прийом зерна лише у справні елементи, уникнувши втрат або перевантаження.

Система SCADA здійснює аналіз усіх можливих маршрутів транспортування, обчислюючи сумарний коефіцієнт пошкодження зерна:

$$C_6(R_j) = \sum_{i=1}^n K_{6i} \cdot k_i, \quad (19)$$

де K_{6i} — коефіцієнт бою зерна для кожного елемента, k_i — бінарна змінна, що вказує, чи включено елемент у маршрут.

Оптимальний маршрут вибирається за умови:

$$R_{opt} = \arg \min_{R_j} (C_6(R_j)), \quad (20)$$

тобто система вибирає той маршрут, у якому очікувані втрати зерна найменші.

У разі виявлення несправності або перевантаження будь-якого елемента:

$$\text{якщо } (\neg X_3 \vee X_6) \rightarrow k_i = 0, \quad (21)$$

відбувається перебудова маршруту — виключення проблемного елемента з логіки та повторне обчислення оптимального шляху.

Контроль у реальному часі (SCADA + ПЛК):

$$Y_3 = X_3 \wedge X_8. \quad (22)$$

Це дає змогу підтримувати актуальну інформацію про роботу обладнання та оперативно адаптувати логіку.

Таким чином, алгоритм системи мінімізації бою зерна можна представити графічно для управління транспортуванням зерна (рис. 5).

Як бачимо, уся система працює у зв'язці SCADA + ПЛК, де перша приймає рішення, а другий керує виконавчими механізмами, ураховуючи логічні умови та технічні параметри. Завдяки

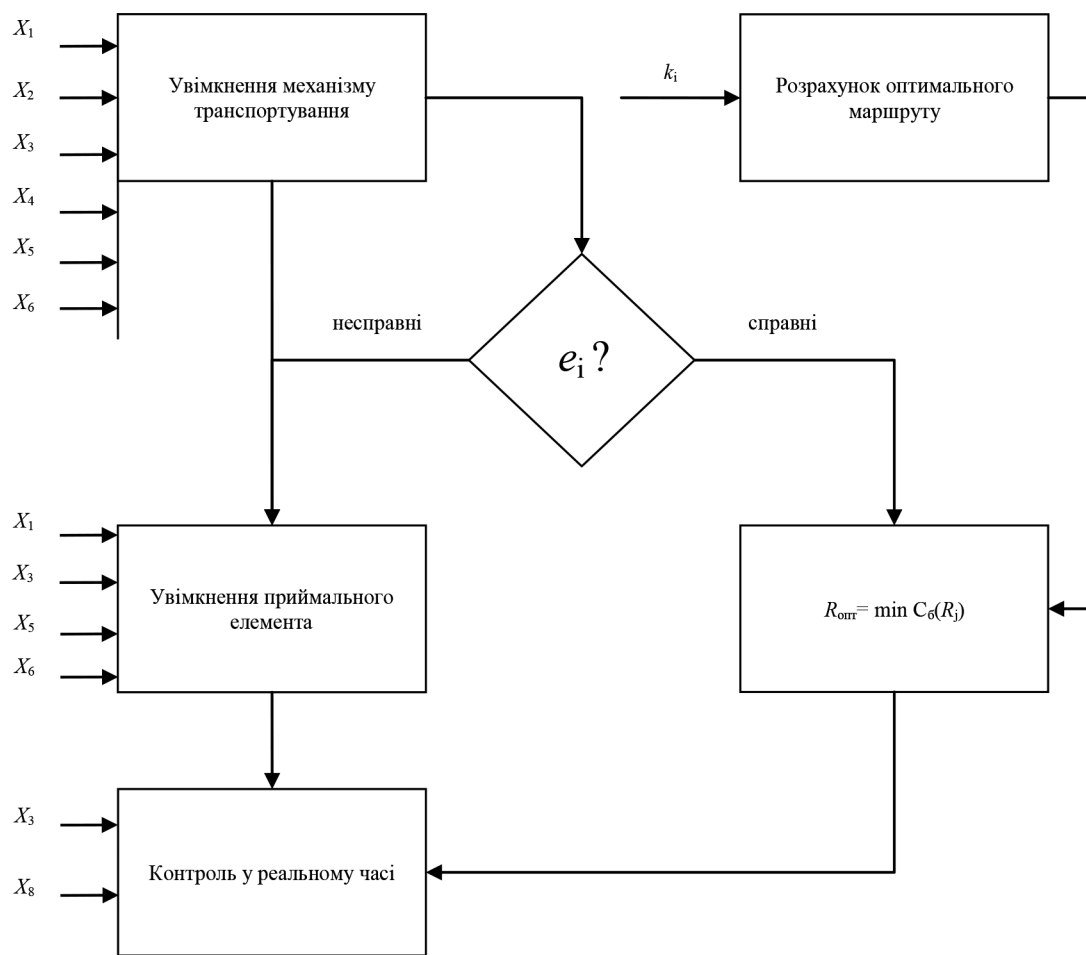


Рис. 5. Схема системи логічних рівнянь для управління транспортуванням зерна

цьому мінімізуються пошкодження зерна, зберігається його якість, підвищуються енергоефективність і надійність роботи елеватора.

Висновки. Упровадження критерію мінімізації бою зерна у програмно-логічний контролер автоматизованої системи транспортування забезпечує вибір маршруту з найменшими втратами якості продукції. Завдяки розробленому алгоритму оптимізації система формує або вибирає маршрут, який мінімізує механічні ушкодження зерна, ураховуючи технічний стан обладнання, ступінь зносу механізмів, швидкість їхньої роботи та ризик перевантажень. Це дає змогу істотно знизити частку травмованого зерна та зберегти його технологічну та посівну придатність.

Оптимізація транспортування реалізується через обчислення сумарного коефіцієнта бою зерна для кожного маршруту та вибір варіанта з найменшим значенням. Для цього

використовуються логічні рівняння та спеціалізовані алгоритми, зокрема динамічна маршрутизація з адаптацією до поточного стану вузлів транспортної системи. При цьому система забезпечує проходження зерна через обладнання, що має мінімальний негативний вплив на його цілісність.

Розроблена математична модель урахує обмеження на використання несправних або перевантажених елементів маршруту та виключає їх із процесу. Система логічних умов забезпечує транспортування зерна лише за умови готовності приймальних вузлів, правильно заданого напрямку, оптимальної швидкості та наявності живлення. Такий підхід дає змогу уникати пошкодження продукції, зменшити кількість утрат та підвищити надійність усього логістичного процесу.

Таким чином, інтеграція критерію мінімізації бою зерна у систему управління транспортуванням підвищує якість продукції.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Механічне травмування зерна після збирання / В. В. Опалко та ін. *Agroexpert*. 2017. № 2. С. 1–8.
2. Analysis of grain damage by the bucket elevator during loading/unloading / A. Nurmagambetov та ін. *Communications – Scientific Letters of the University of Žilina*. 2024. Т. 26. № 1. Р. 54–62.
3. Gelnar D., Zegzulka J. Bucket Elevator Filling and Discharge/Discrete Element Method in the Design of Transport Systems. *GRAIN JOURNAL*. 2023. Р. 27–47.

4. Beumer Group. High-performance belt bucket elevators: Analysis of backfall in grain handling. *Cement Lime Gypsum*. 2021. Т. 74, № 3. Р. 45–48.
5. Риспаєв К. Ж. Аналіз травмування зерна у ковшових норіях з урахуванням зворотного висипання. *Вісник ТДАТУ*. 2023. № 4(40). С. 31–37.
6. Kulagin M. S., Solov'ev V. M. та Zheltov V. S. Advantages and disadvantages of highspeed bucket elevators as compared to the lowspeed ones. *Forestry Engineering Journal*. 2015. Т. 4, № 4. Р. 201–205.
7. Мардзявко В. А. Аналіз організації керування обладнанням для забезпечення транспортування зернової продукції на елеваторах. *Інженерія природокористування*. 2020. Т. 18. № 4. С. 35–41.
8. Тимчук С. О., Сиротенко М. О. Підвищення ефективності технологічного процесу елеваторного комплексу за рахунок оптимальної маршрутизації. *Інженерія природокористування*. 2021. Т. 22. № 4. С. 82–88.
9. Тимчук С. О., Кунденко П. М., Вахоніна Л.В. Аналіз транспортування зернової продукції на елеваторах. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2021. Т. 4. № 112. С. 96–106.
10. Просяник О. В., Просяник М. О., Ткаченко С. М. Перспективні напрями розвитку автоматизованих систем на підприємствах зберігання та переробки зерна. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2020. № 39. С. 128–136.
11. Mardziavko V., Rudenko A. Optimization of the algorithm of the routing process of the elevator complex for the transportation of grain. *International periodic scientific journal "Modern engineering and innovative technologies"*. 2024. № 35. Р. 37–47.
12. Мардзявко В., Кунденко М., Руденко А. Використання критеріїв для оптимізації процесу маршрутизації елеваторного комплексу. *Електротехніка та електроенергетика*. 2023. № 4. С. 44–50.

REFERENCES:

1. Opalko, V., Shatrov, R., Shysh, A., & Marchenko, V. (2017) Mechanical injury of grain after harvesting. *Agroexpert*, (2), 1–8.
2. Nurmagambetov, A., Kurmanov, A., Ryspayev, K., Bekmirza, Z., & Keklis, A. (2024). Analysis of grain damage by the bucket elevator during loading/unloading. *Communications – Scientific Letters of the University of Žilina*, 26(1), 54–62.
3. Gelnar, D., & Zegzulka, J. (2023). Bucket Elevator Filling and Discharge/Discrete Element Method in the Design of Transport Systems. *GRAIN JOURNAL*, 27–47.
4. Beumer Group. (2021). High-performance belt bucket elevators: Analysis of backfall in grain handling. *Cement Lime Gypsum*. 74(3), 45–48.
5. Ryspaiev, K. Zh. (2023). Analysis of grain injury in bucket elevators taking into account reverse precipitation. *Bulletin of the TSATU*, 40(4), 31–37.
6. Kulagin, M. S., Solov'ev, V. M., & Zheltov, V. S. (2015). Advantages and disadvantages of high speed bucket elevators as compared to the low speed ones. *Forestry Engineering Journal*, 4(4), 201–205.
7. Mardziavko, V. (2020). Analiz orhanizatsii upravlinnia obladnanniam dlia zabezpechennia transportuvannia zernovoi produktsii na elevatorakh [Analysis of the organization of equipment management for ensuring the transportation of grain products at elevators]. *Inzheneriya pri-rodokorstvannya*, 18(4), 35–41 [in Ukrainian].
8. Tymchuk, S. O., & Syrotenko, M. O. (2021). Pidvyshchennia efektyvnosti tekhnolohichnoho protsesu elevatornoho kompleksu shliakhom optymalnoi marshrutyzatsii [Increasing the efficiency of the technological process of an elevator complex through optimal routing]. *Environmental Engineering*. 22(4), 82–88 [in Ukrainian].
9. Tymchuk, S. O., Kundenko, P. M., & Vakhonina, L. V. (2021). Analiz transportuvannia zernovoi produktsii na elevatorakh [Analysis of grain product transportation in elevators]. *Bulletin of the Black Sea Agricultural Science*, 4(112), 96–106 [in Ukrainian].
10. Prosyanyk, O. V., Prosyanyk, M. O., & Tkachenko, S. M. (2012). Perspektyvni napriamky rozvytku avtomatyzovanykh system na pidpriemstvakh zi zberihannia ta pererobky zerna [Promising directions of development of automated systems at grain storage and processing enterprises]. *Collection of scientific papers of the National Mining University*. 39, 128–136 [in Ukrainian].
11. Mardziavko, V., & Rudenko, A. (2024). Optymizatsiia alhorytmu protsesu marshrutyzatsii elevatornoho kompleksu dlia perevezennia zerna [Optimization of the algorithm of the routing process of the elevator complex for the transportation of grain]. *International periodic scientific journal "Modern engineering and innovative technologies"*, (35), 37–47 [in Ukrainian].
12. Kundenko, M. P., Mardzyavko, V. A., & Rudenko, A. Yu. (2024). Vykorystannia kryteriiv optymizatsii dlia protsesu marshrutyzatsii elevatornoho kompleksu [Using optimization criteria for the routing process of an elevator complex]. *Electrical Engineering and Power Engineering*. 4, 44–50 [in Ukrainian].