УДК. 62-50

ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГОВИКОРИСТАННЯ ПІД ЧАС МАРШРУТИЗАЦІЇ ТРАНСПОРТУВАННЯ ЗЕРНА ЕЛЕВАТОРА

МАРДЗЯВКО В.А. асистент, Миколаївський національний аграрний університет, Миколаїв, Україна, e-mail: vitalijmardzavko@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7327-9215;

РУДЕНКО А.Ю. асистент, Миколаївський національний аграрний університет, Миколаїв, Україна, e-mail: andrey0911r@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5103-6412;

Мета роботи. *Метою даної роботи є створення математичної моделі та обґрунтування алгоритму для мінімізації енергоспоживання під час транспортування зерна в елеваторному комплексі шляхом оптимізації маршруту транспортування.*

Методи дослідження. *Був застосований аналітичний метод дослідження для вивчення існуючих підходів до оптимізації маршрутів та алгоритмів мінімізації енергоспоживання. Застосовано математичний метод для формалізації задачі мінімізації енергоспоживання в елеваторному комплексі. Використано алгоритмічний метод для розробки та адаптації алгоритмів, таких як задача комівояжера, до специфіки транспортування зерна.*

Отримані результати. *Отримані результати показали, що впровадження алгоритму оптимізації маршруту транспортування зерна на основі критерію мінімізації енергоспоживання дозволяє значно знизити загальні енерговитрати елеваторного комплексу. Розроблена математична модель і алгоритм на основі задачі Комівояжера дозволяє описати та пояснити забезпечення ефективного вибору маршруту, що проходить через усі необхідні вузли лише один раз, з мінімальними енергетичними витратами. Система логічних рівнянь, що враховує стан вузлів, перевантаження, швидкість і напрямок руху, забезпечить свою ефективність у зниженні споживання енергії.*

Наукова новина. *Наукова новизна роботи полягає у розробці алгоритму вибору оптимального маршруту транспортування зерна на основі мінімізації енергоспоживання, що інтегрує математичну модель задачі комівояжера з умовами Міллера-Таккера-Земліна для виключення підциклів. Вперше запропоновано систему логічних рівнянь, яка враховує стан вузлів, напрямок руху, швидкість та відсутність перевантаження. Алгоритм також оптимізує час транспортування, що забезпечує підвищення енергоефективності та продуктивності автоматизованих елеваторних систем.*

Практична цінність. *Практична цінність дослідження полягає у можливості впровадження розробленого алгоритму в автоматизовані системи управління елеваторними комплексами для підвищення енергоефективності та оптимізації роботи. Запропонована методика дозволяє автоматично вибирати маршрути з мінімальним енергоспоживанням, враховуючи технічні характеристики обладнання та умови експлуатації. Це сприяє зниженню загальних витрат електроенергії, підвищенню продуктивності та надійності системи, забезпечуючи економічну вигоду та стабільну роботу транспортної інфраструктури.*

Ключові слова: оптимізація енергоспоживання, алгоритм маршрутизації, елеваторний комплекс, програмно-логічний контролер, задача комівояжера, математична модель, автоматизація, енергоефективність, логічні рівняння, транспортна система.

I. ВСТУП

У сучасних умовах ефективне використання енергоресурсів є одним із ключових аспектів оптимізації роботи зернопереробних комплексів, зокрема елеваторів. Технологічний процес транспортування зерна відзначається значною енергоємністю, оскільки включає в себе взаємопов'язані операції переміщення, обробки та зберігання зернових культур. Проаналізувавши методи прокладання маршрутів і процес управління ними [1] - [5], можна відзначити, що увага майже не приділялася якості цих маршрутів з точки зору їх ефективності, продуктивності, економічної доцільності та логістики, а також їхнього впливу на транспортувальне обладнання. Вивчаючи автоматизовану систему управління елеваторами (рис. 1) [6], яка охоплює численні функції для підтримки технологічного процесу, варто зауважити, що завдання оптимізації маршруту транспортування зерна в ній реалізоване недостатньо. Це, у свою чергу, призводить до втрат як в економічному, так і в якісному аспектах виробництва.

Сучасні підходи до раціональної організації транспортування зернової продукції на елеваторних комплексах базуються на використанні промислових контролерів, що сумісні з персональними комп'ютерами, електронно-обчислювальними машинами та програмним забезпеченням, які разом формують автоматизовану систему управління технологічними процесами [7].

© Мардзявко А.В., Руденко А.Ю., 2024
DOI 10.15588/1607-6761-2024-4-3

Рисунок 1. Внутрішня структура автоматизованої системи елеваторного комплексу

Програмно - логічний контролер (ПЛК) є ключовим компонентом автоматизації елеваторної системи, оскільки виконує основні функції з управління та захисту обладнання. Алгоритми управління реалізуються через систему логічних рівнянь, що генерують керуючі сигнали для виконавчих механізмів [2] - [8] - [9].

$$\begin{cases} Y_1 = X_7 \& X_6 \& X_5 \& X_3 \& \left(X_1 \& X_2 \& X_4 + \overline{X_1} + X_1 \& \overline{X_2} \right) \\ Y_2 = X_7 \& X_6 \& X_5 \& \overline{X_3} \& \left(X_1 \& X_2 \& X_4 + \overline{X_1} + X_1 \& \overline{X_2} \right) \end{cases}, \quad (1)$$

де X_1, X_2 - контроль потокового стану об'єкта, X_3 - задано напрямок руху вперед, X_4 - швидкість руху задовільна, X_5 - рух відповідає заданому напряму, X_6 - перевантаження механізму, X_7 - готовність наступного пристрою до прийому, X_8 - живлення, Y_1 - рух уперед, Y_2 - рух назад.

Згідно із зазначеними рівняннями, можна стверджувати, що ключовим елементом у забезпеченні процесу управління є сигнал, сформований на основі алгоритму управління та логічних рівнянь. Таким чином, побудова маршруту безпосередньо залежить від точно сформованих систем логічних рівнянь, які визначають алгоритм прокладання та функціонування маршруту.

II. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Аналізуючи автоматизований процес прокладання маршруту [4], [5], [7], [10] - [14], можна відзначити, що транспортування здійснюється через автоматичний вибір із бази даних першого доступного маршруту, запрограмованого інженером заздалегідь, без урахування специфічних вимог або умов. Оператор також може самостійно обирати маршрут зі списку стандартних варіантів або формувати його вручну - крок за кроком, пристрій за пристроєм. Це, однак, підвищує ймовірність помилок, що призводить до виробничих і економічних втрат. Оскільки жоден із обраних або збудованих маршрутів не враховує певні умови та вимоги для поліпшення показників, важливо, щоб ці вимоги визначалися через критерії оптимізації.

Нинішні алгоритми побудови маршрутів транспортування не оптимальні для технологічного процесу, оскільки не враховують критерії, які могли б удосконалити транспортування. Відсутність таких критеріїв означає, що програмування маршрутів виконується без уваги до енерговитрат, якості продукції, швидкості транспортування, зношеності обладнання тощо. Тому для досягнення оптимального маршруту транспортування необхідно впровадити відповідні критерії оптимізації.

На рис. 2 [6] показано, як оптимізаційний маршрут залежить від обраного критерію оптимізації, що допомагає вибрати відповідний маршрут транспортування.

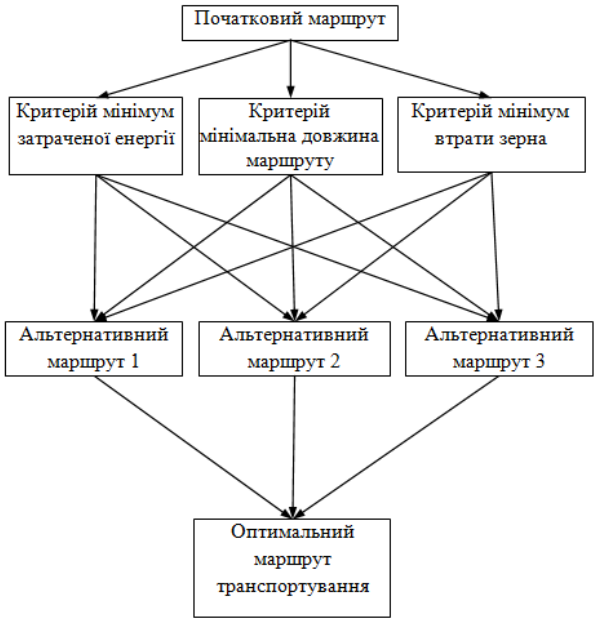

Рисунок 2. Схема взаємозв'язків між критеріями оптимізації та побудовою альтернативних маршрутів транспортування [6]

Отже, завдяки використанню критеріїв оптимізації, система здатна обирати більш ефективний маршрут із числа запрограмованих варіантів. Змінюючи критерії, можна прокладати альтернативні маршрути, що відрізняються від стандартних, і таким чином досягати більшої гнучкості без додаткових витрат.

Як приклад можна розглянути генерацію прибутку елеватора, для якої важливо забезпечити експортну якість зерна. З цією метою часто доводиться штучно змішувати різні партії, що можливо завдяки альтернативним маршрутам транспортування. Крім того, зерно, призначене для експорту, має відповідати вищим вимогам, і в такому разі застосування критеріїв мінімізації втрат зерна та скорочення часу транспортування дозволить прокласти маршрут, який знизить коефіцієнт пошкоджень, покращуючи якість продукції.

При аналізі технологічного процесу (рис. 2) можна відзначити, що одним із критеріїв оптимізації, який забезпечує енергоефективність роботи зернопереробних і зернозберігаючих комплексів, є мінімізація витрат електроенергії під час транспортування (споживання електроенергії на маршруті).

III. ФОРМУЛЮВАННЯ МЕТИ РОБОТИ

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

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

Впровадження критерію мінімізації витрат електроенергії до програмно-логічного контролера автоматизованої системи дозволить визначити доступні на даний момент маршрути для переміщення зерна від вихідної до кінцевої точки. З цих маршрутів, використовуючи принцип оптимальності та з урахуванням потужності приводів транспортного обладнання, буде обрано або побудовано новий оптимальний маршрут транспортування. Для виконання умов оптимізації контролер видаватиме команди з вихідних затискачів на підготовку електроприводів, клапанів і засувок, що входять до складу технологічного обладнання. Після подачі команди система автоматично запускає лінію, забезпечуючи її роботу з урахуванням програмно-логічних технологічних блокувань та мінімізуючи витрати електроенергії.

Енергоємність комплексу транспортно-технологічних операцій обладнання визначається загальною кількістю енергії, що витрачається на виконання взаємопов'язаних транспортних та технологічних операцій. Таким чином, критерій оптимальності - мінімізація електроспоживання маршруту - можна охарактеризувати як суму потужностей електроприводів технологічних установок, а також приводів клапанів та засувок, що виконують технологічну операцію:

$$C_{e.\min} = \sum P_{e.дв.} k_n + \sum P_{e.кл.} k_n + \sum P_{e.зас.} k_n, \quad (2)$$

де $\Sigma P_{е.дв.}$ - сума споживаної потужності електроприводів; $\Sigma P_{е.кл.}$, $\Sigma P_{е.\ зас.}$ - сума споживаної потужності задіяних приводів клапанів та засувок відповідно; k - коефіцієнт, яких характеризує задіяність елемента в процесі маршрутизації ($k = 0$ - елемент використовується для транспортування, $k = 1$ - елемент не використовується для транспортування).

Застосування цього критерію при розробці основного або альтернативного маршруту транспортування може сприяти підвищенню енергоефективності технологічного процесу в елеваторному комплексі, що в свою чергу створює потребу в удосконаленні процесу маршрутизації транспортування.

Алгоритм вибору маршруту на основі критерію мінімізації енерговитрат представлено на рис. 3.

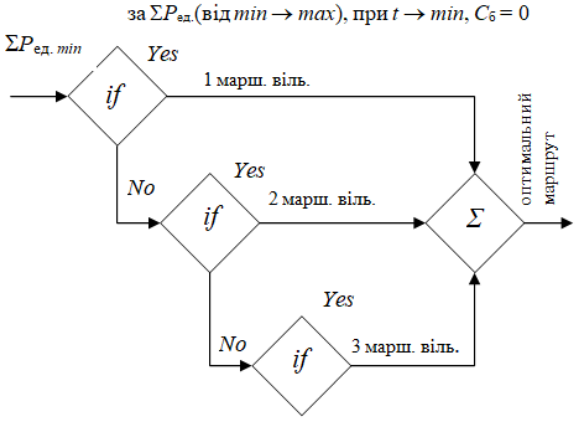

Рисунок 3. Алгоритм вибору прокладання маршруту за критерієм *min* енерговитрат

Згідно з цим алгоритмом, маршрут транспортування прокладатиметься від мінімального до максимального значення, залежно від загальної потужності електроприводів усіх задіяних технологічних установок.

Для розрахунку енерговитрат використовують як прості формули (на основі потужності і часу роботи), так і складні математичні моделі. Усе це інтегрується в алгоритми автоматизованої системи управління, що дозволяє мінімізувати витрати електроенергії на транспортування зерна. Іншими словами, система вибиратиме маршрут для транспортування зерна, орієнтуючись на результати умовної оптимізації та перевіряючи доступність кожного маршруту, якщо маршрут вільний, він буде обраний на основі суми потужностей його складових елементів. Ефективність електроприводів враховується через показники ККД, частотне регулювання, контроль перевантажень.

Таким чином, алгоритм дозволяє системі не лише вибирати з наявних маршрутів, а й формувати новий маршрут, спираючись на дані умовної оптимізації та технічні характеристики електротехнічного обладнання, задіяного в процесі транспортування. До таких даних належать призначення транспортних компонентів, їх роль у переміщенні та потужність.

Впровадження цього критерію додає ще одну умову транспортування - мінімізацію часу, що дозволяє знизити енергоспоживання та водночас забезпечити оптимальну тривалість маршруту і кількість залучених установок. Це позитивно впливає на швидкість транспортування, проте при цьому не враховуються можливі втрати зернової продукції.

Алгоритм, представлений на рис. 3, можна описати математично, виходячи із завдання

мінімізації енергоспоживання під час вибору маршруту.

Завдання оптимізації полягає в мінімізації сумарного енергоспоживання, позначеного як $\Sigma P_{е.м.}$, де $P_{е.м}$ - енергоспоживання механізмів, що матиме вигляд:

$$\min \Sigma P_{е.м.}, \quad (3)$$

при $C_б = 0$ умові нульового впливу навантаження від зерна.

Умови вибору заданого алгоритму передбачає вибір між трьома варіантами в залежності від кількості доступних "вільних механізмів" На кожному етапі перевіряються такі умови:

- якщо доступний 1 вільний механізм: якщо умова виконується, використовується 1 механізм, перехід на наступний етап підсумовування.
- якщо немає вільного механізму першому етапі, перевіряється можливість використання 2 вільних механізмів: якщо так, то використовуються 2 механізми, перехід на етап підсумовування.
- якщо обидві попередні умови не виконуються, перевіряється можливість використання 3 вільних механізмів: якщо так, то використовуються 3 механізми, перехід на етап підсумовування.

На кожному етапі підсумовується загальне енергоспоживання доступних механізмів Оптимальний маршрут вибирається, виходячи з найменшого значення $\Sigma P_{е.м.}$, що є рішенням завдання, отже, математично процес вибору маршруту можна записати так:

$$\text{Мінімізація: } \Sigma P_{е.м.}(t) \to \min, \quad (4)$$

де підсумовуються енерговитрати механізмів кожного можливого маршруту, а кількість механізмів визначається умовами алгоритму.

Такий підхід до вибору маршруту мінімізує загальні енерговитрати системи, виходячи з перевірки доступних ресурсів (вільних механізмів) кожному етапі.

Для побудови математичної моделі маршруту з мінімізацією енергоспоживання виходячи з представленого математично опису виконає побудову математична модель задачі мінімізації енергоспоживання при виборі маршруту.

Залежно від доступних вільних механізмів кожної ділянці, використовуються різні механізми, це можна записати як набір умов:

$$\sum_{m=1}^{3} N_m \le \max \text{кількість механізмів}, \quad (5)$$

де $N_м$ - число механізмів, що використовуються для проходження ділянки, наприклад: якщо доступний 1 вільний механізм, використовується його енергоспоживання C_{ij1}; якщо є 2 вільні механізми, вибирається мінімальна сума їх енергоспоживання C_{ij2}; якщо 3 механізми, то мінімізується сума C_{ij3}.

Звідси енергоспоживання на ділянці маршруту між пунктами i та j, можна записати у вигляді:

$$P_{ij} = \begin{cases} C_{ij1}, \text{якщо використовується 1 механізм} \\ C_{ij2}, \text{якщо використовується 2 механізм} \\ C_{ij3}, \text{якщо використовується 3 механізм} \end{cases}, \quad (6)$$

де $i, j \in V$ - безліч вузлів маршруту.

Обмеження на вибір маршруту передбачає, що маршрут має бути замкнутим (для завдань, пов'язаних з циклічною маршрутизацією, наприклад, у транспортних системах) або повинен починатися з початкової точки і завершуватися в кінцевій:

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ij} = 1 \; \forall j \text{ (вхід до вузла)}, \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ij} = 1 \; \forall i \text{ (вихід з вузла)}, \quad (8)$$

Ці умови гарантують, що маршрут проходить через усі необхідні точки.

Умова цілісності вимагає, щоб змінні x_{ij} були бінарними, тобто приймали лише значення 0 або 1.

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \quad (9)$$

Отже, повна математична модель задачі мінімізації енергоспоживання при виборі маршруту виглядає так:

$$P_{е.д.\min} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} P_{ij} x_{ij}, \quad (10)$$

за умов:

1) обмеження кількості вільних механізмів:

$$\sum_{m=1}^{3} N_m \le \max \text{кількість механізмів},$$

та вибір відповідного механізму:

$$P_{ij} = \begin{cases} C_{ij1}, \text{якщо використовується 1 механізм} \\ C_{ij2}, \text{якщо використовується 2 механізм} \\ C_{ij3}, \text{якщо використовується 3 механізм} \end{cases},$$

2) обмеження на вибір маршруту:

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ij} = 1 \; \forall j, \quad \sum_{i=1}^{n} x_{ij} = 1 \; \forall i,$$

3) умова цілісності:

$$x_{ij} \in \{0,1\}$$

Ця модель дозволить вибрати маршрут, який мінімізує енерговитрати на підставі наявності вільних механізмів та витрат на кожній ділянці колії.

Для вирішення описаної математичної моделі мінімізації енергоспоживання при виборі маршруту

можна скористатися алгоритмами для вирішення задачі комівояжера.

Завдання комівояжера (TSP - Traveling Salesman Problem) [15] при виборі маршруту може бути використана, якщо потрібно знайти маршрут, який проходить через всі вузли рівно один раз з мінімальними енерговитратами, і при цьому можна використовувати різні механізми, що впливають на енергоспоживання.

Адаптація методу комівояжера для застосування в транспортних процесах елеваторного комплексу зображено на рис. 4.

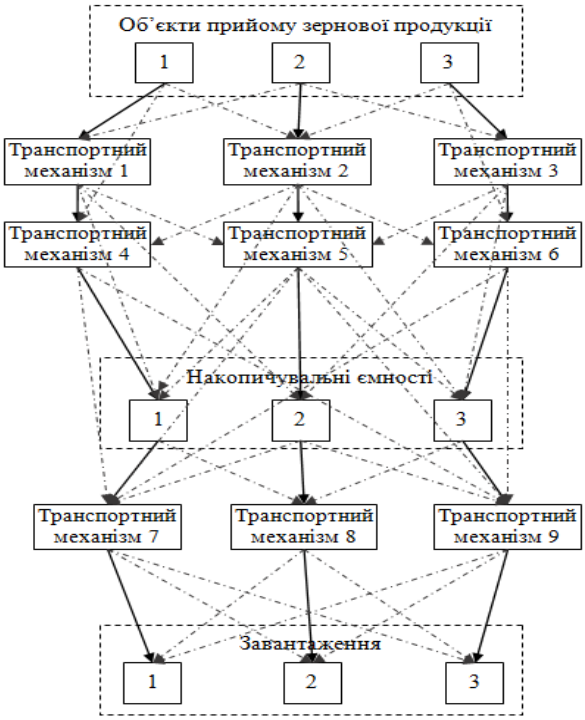

Рисунок 4. Технологічної схеми транспортування зерна за задачею Комівояжера

При математичному формуванні моделі мінімізації сумарного енергоспоживання для завдання комівояжера, нехай $G=(V, E)$ є повним графом, де V - множина вузлів транспортного маршруту $V = \{0,1,\ldots,n\text{-}1\}$, а E - множина ребер, що з'єднують ці вузли. Нехай P_{ij} визначає енергоспоживання на відрізку маршруту між вузлами i та j, де необхідно знайти цикл транспортування, який мінімізує загальні витрати енергії. Отже цільова функція матиме вигляд:

$$P_{e.\partial.\min} = \min \sum_{(i,j)\in E} P_{ij} x_{ij}\,, \qquad (11)$$

де x_{ij} □ $\{0,1\}$ - бінарна змінна, що дорівнює 1, якщо маршрут проходить через ребро (i, j), та 0 - в інших випадках; P_{ij} - енерговитрати на переміщення між вузлами i та j, де i,j □ V та $P_{ij} \geq 0$ для всіх $i \neq j$, $P_{ij} = 0$.

Обмеження для даної цільової функція, виходять з формування задачі, що кожен вузол відвідується рівно один раз:

$$\sum_{i=0,\, j\neq i}^{n} x_{ij} = 1 \;\; \forall i \in V, \qquad \sum_{i=0,\, j\neq i}^{n} x_{ij} = 1 \;\; \forall j \in V\,, \qquad (12)$$

Ці обмеження гарантують, що кожен вузол має рівно одне ребро, що входить і одне ребро, що виходить із нього.

Для усунення підциклів використовується допоміжна змінна u_i, яка визначає позицію вузла i у маршруті транспортування. Обмеження, спрямовані на виключення підциклів, мають такий вигляд:

$$u_i - u_j + n \cdot x_{ij} \leq n-1 \;\forall i \neq 0, j \neq 0\,, \qquad (13)$$

$$1 \leq u_i \leq n-1 \;\forall i \in V, i \neq 0\,, \qquad (14)$$

де u_i - допоміжна змінна для усунення підциклів (підмодель Міллера-Таккера-Земліна).

Ці обмеження забезпечують, що маршрут є єдиний цикл, а чи не безліч підциклів.

Бінарні змінні:

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in V\,, \qquad (15)$$

В результаті математична модель для визначення мінімізації енергоспоживання за задачею Комівояжера матиме вигляд:

$$P_{e.\partial.\min} = \min \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} P_{ij} x_{ij}\,, \qquad (16)$$

Модель (12-16) спрямована на мінімізацію загальних енерговитрат по всіх ребрах маршруту, тоді як обмеження 1 і 2 забезпечують відвідування кожного вузла рівно один раз. Умови Міллера-Таккера-Земліна [16] (обмеження 3) усувають можливість підциклів, гарантуючи формування єдиного замкнутого циклу для маршруту.

Отже, сформульована модель являє собою завдання цілісного лінійного програмування з бінарними змінними для мінімізації сумарних енерговитрат у задачі Комівояжера. Вона може бути вирішена за допомогою стандартних методів оптимізації, таких як симплекс-метод з цілим розширенням.

На основі сформульованої моделі, виконаємо побудову системи логічних рівнянь які б забезпечували мінімізацію сумарного енергоспоживання в процесі транспортування зернової маси в елеваторному комплексі. Для формулювання системи логічних рівнянь мінімізації сумарного енергоспоживання для маршутизації елеватора, необхідно врахувати потоки зерна між вузлами, а також витрати енергії на кожному етапі. Як було зазначено раніше, логічні рівняння описуватимуть умови, при яких механізм елеватора переміщує зернову масу, і будуть засновані на поточному стані системи та заданих параметрах.

Основними елементами задачі є: енергоспоживання P_{ij} - кількість енергії, необхідної для переміщення зерна між вузлами і та j; вузли транспортної

системи: N_1, N_2,…, N_n - кожен вузол може бути перевалочною точкою або кінцевим пунктом для переміщення зерна; бінарні змінні x_{ij} □ {0,1} змінні, що визначають наявність або відсутність переміщення зерна між вузлами *i* та *j*; додаткові змінні для контролю стану елеватора: контроль перевантаження, готовність до прийому, швидкість переміщення і т.д.

Також до основних елементів системи логічних рівнянь необхідно віднести логічні змінні, під час виконання процесу транспортування: X_1, X_2,…, X_n - стан вузлів (наприклад, готовність до прийому зерна, чи є місце для наступної порції зерна); X_3 - напрямок руху матеріалу (вперед або назад по системі); X_4 - швидкість переміщення задовільна; X_5 - перевантаження механізму; X_6 - готовність наступного вузла до прийому; X_7 - живлення активне.

Як і в попередньому випадку, для побудови логічних рівнянь для мінімізації енергоспоживання ведемо логічні умови для керування переміщенням зерна між вузлами вимагають, щоб зерно транспортувалося лише за наявності наступних умов: вузол *i* готовий до відправки (контроль стану X_1 і X_2); напрямок руху зерна заданий правильно (X_3); швидкість переміщення задовільна (X_4); відсутнє перевантаження (X_5); вузол *j* готовий прийняти зерно (X_6); та система має активне живлення (X_7).

В результаті логічне рівняння для переміщення зерна між вузлами *i* та *j* має вид:

$$x_{ij} = X_1 \wedge X_2 \wedge X_3 \wedge X_4 \wedge -X_5 \wedge X_6 \wedge X_7 , \quad (17)$$

Відповідно до зазначеного логічного рівняння визначаємо обмеження:
кожен вузол може відправляти та отримувати зерно лише один раз

$$\sum_{j=1,\, j\neq i}^{n} x_{ij} \leq 1 \;\; \forall i, \qquad \sum_{i=1,\, i\neq i}^{n} x_{ij} = 1 \;\; \forall j \;\; , \qquad (18)$$

якщо на якомусь етапі система перевантажена, рух зерна припиняється:

$$X_5 = 0 \Rightarrow x_{ij} = 0 \quad \forall i, j , \qquad (19)$$

в результаті отримаємо рівняння мінімізації енергоспоживання:

$$P_{e.д.\min} = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1, j\neq i}^{n-1} P_{ij} \cdot \left(X_1 \wedge X_2 \wedge X_3 \wedge X_4 \wedge -X_5 \wedge X_6 \wedge X_7 \right), \quad (20)$$

Враховуючи вищезазначене, система логічних рівнянь (17-20) включає: цільову функцію для мінімізації енергоспоживання, обмеження на вхід і вихід для кожного вузла, а також обмеження на перевантаження. Вона мінімізує сумарне енергоспоживання, враховуючи витрати енергії для кожного можливого шляху між вузлами. Логічні рівняння забезпечують переміщення зерна тільки за виконання всіх критеріїв, таких як стан вузлів, напрямок, швидкість і відсутність перевантаження. А обмеження заданої системи гарантують, що кожен вузол використовується лише один раз для відправки та прийому зерна, а також запобігають перевантаженню системи.

Ця система рівнянь може слугувати основою для розробки оптимальних алгоритмів побудови маршрутів транспортування в елеваторному комплексі, спрямованих на зниження енергоспоживання та підвищення ефективності транспортування зерна.

V. ВИСНОВОК

Впровадження критерію мінімізації витрат електроенергії у програмно-логічний контролер автоматизованої системи транспортування зерна дозволяє обрати оптимальний маршрут з мінімальними енерговитратами. Завдяки алгоритму оптимізації система формує або вибирає найекономніший маршрут з урахуванням потужності приводів та вимог щодо технічного стану обладнання. Це значно підвищує енергоефективність процесу, знижуючи загальне споживання електроенергії для транспортування.

Оптимізація енергоспоживання реалізується шляхом обчислення сумарної потужності всіх задіяних приводів і вибору маршруту з найменшими енергетичними витратами. Для цього використовуються логічні умови й алгоритми, зокрема алгоритм комівояжера, який мінімізує витрати енергії, враховуючи всі вузли маршруту і забезпечуючи проходження через кожен із них один раз.

Розроблена математична модель алгоритму враховує обмеження на використання механізмів і виключає підцикли, що сприяє формуванню єдиного оптимального шляху. Система логічних рівнянь, побудована на основі цього алгоритму, задає умови мінімізації енерговитрат, керуючи рухом зерна тільки за умови готовності вузлів до прийому, правильного напрямку, належної швидкості та відсутності перевантаження. Цей підхід запобігає перевантаженню системи та забезпечує економне використання енергії при дотриманні всіх вимог безпеки та функціональності.

Таким чином, інтеграція зазначеного критерію оптимізації забезпечує ефективне і безперервне транспортування зерна з мінімальними енерговитратами, підвищуючи загальну енергоефективність елеваторного комплексу та дозволяючи уникнути непродуктивних втрат.

ЛІТЕРАТУРА

[1] Мардзявко, В. (2020). Аналіз організації керування обладнанням для забезпечення транспортування зернової продукції на елеваторах. *Інженерія природокористування*, *18*(4), 35–41. DOI:10.37700/enm.2020.4(18).35-41

[2] Мардзявко В. А., Тимчук С. О, Сиротенко М. О . (2021). Підвищення ефективності технологічного

процесу елеваторного комплексу за рахунок оптимальної маршрутизації. Інженерія природокористування. 22(4), 82–88. DOI: 10.5281/zenodo.6964706

[3] Мардзявко, В. А., & Тимчук, С. О. (2021). Аналіз методу маршрутизації транспортно-технологічних ліній переміщення зерна на елеваторах. У *Молодь і сільськогосподарська техніка у XXI сторіччі* (с. 233–234).

[4] Тимчук, С. О., Кунденко, П. М., & Вахоніна, Л. В. (2021). Аналіз транспортування зернової продукції на елеваторах. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*, *4*(112), 96–106. DOI: 10.31521/2313-092X/2021-4(112)-10

[5] Просяник О. В., Просяник М. О., Ткаченко С. М. (2012). Перспективні напрямки розвитку автоматизованих систем на підприємствах зберігання та переробки зерна. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 39, 128–136.

[6] Мардзявко, В. (2022). Критерій оптимальності елеваторного комплексу для підвищення енергоефективності. *Analysis of modern ways of development of science and scientific discussions* (с. 571–575).

[7] Просяник О. В. (2010). Застосування SCADA – системи для керування технологічними маршрутами транспортування зерна, *Зберігання та переробка зерна*. 4, 51–55.

[8] Dyck, G. (2023). Digital Twins: A novel traceability concept for post-harvest handling. *Smart Agricultural Technology*, (3), 2772–3755. DOI: 10.1016/j.atech.2022.100079

[9] Білюк, І. (2023). Система стеження за мікроманіпулятором на основі п'єзоелектричного двигуна. У *5th International Conference on Modern Electrical and Energy System* (с. 1–6). DOI: 10.1109/MEES61502.2023.10402375

[10] Кунденко, М.П., Мардзявко, В.А., Руденко, А.Ю. (2024). Використання критеріїв оптимізації процесу маршрутизації елеваторного комплексу. *Електротехніка та енергетика*. 4, 44–50. DOI:10.15588/1607-6761-2023-4-5

[11] Соснин, К. В., Ткаченко, С. Н., & Просяник, А. В. (2016). Автоматизація переміщення зерна – осередок інтегрованої АСУ. Зберігання та переробка зерна, 80(2), 32–40.

[12] Просяник, А. В., & Ткаченко, С. М. (2012). Актуальні задачі автоматизації підприємств зберігання і переробки зерна. *Зберігання та переробка зерна*, *8*(158).

[13] Сиротенко, М., Мкртумян, С., & Тимчук, С. (2019). *Спосіб підвищення енергоефективності роботи зернопереробних і зернозберігаючих комплексів* (Патент України № 130996).

[14] Сиротенко, М., Мкртумян, С., & Тимчук, С. (2019). *Спосіб підвищення якості транспортування зерна у зернопереробних і зернозберігаючих комплексах* (Патент України № 148511).

[15] Бишевець Н. Г., Бишовець Н. М., Бойков А. І. (2024). Задача комівояжера як універсальний інструмент для оптимізації маршрутів. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського.* 35(1), 97-102. DOI: 10.32782/2663-5941/2024.1.1/15

[16] Біла Г.Д., Корчинський О.О., Стецюк П.І. (2022). Використання NEOS-сервера для розв'язання двох класів оптимізаційних задач. *Cybernetics and Computer Technologies*. 4, 56–81. DOI: 10.34229/2707-451X.22.4.5

Стаття надійшла до редакції 21.10.2024

OPTIMIZATION OF ENERGY USE DURING GRAIN TRANSPORTATION ROUTING AT THE ELEVATOR

MARDZIAVKO V.A. assistant, Mykolaiv National Agrarian University, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: vitalijmardzavko@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7327-9215;

RUDENKO A.Y. assistant, Mykolaiv National Agrarian University, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: andrey0911r@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5103-6412;

The purpose of the work. *The purpose of this work is to create a mathematical model and justify the algorithm for minimizing energy consumption during grain transportation in the elevator complex by optimizing the transportation route.*

Research methods. *An analytical research method was applied to study existing approaches to route optimization and energy minimization algorithms. A mathematical method is applied to formalize the problem of minimizing energy consumption in the elevator complex. An algorithmic method was used to develop and adapt algorithms, such as the salesman's problem, to the specifics of grain transportation.*

Obtained results. *The obtained results showed that the implementation of the algorithm for optimizing the grain transportation route based on the criterion of minimizing energy consumption can significantly reduce the total energy consumption of the elevator complex. The developed mathematical model and algorithm based on the Salesman's problem allows to describe and explain the provision of efficient route selection that passes through all necessary nodes only once, with minimal energy costs. A system of logical equations that takes into account the state of nodes, overload, speed and direction of movement will ensure its effectiveness in reducing energy consumption.*

Scientific news. *The scientific novelty of the work consists in the development of an algorithm for choosing the optimal grain transportation route based on the minimization of energy consumption, which integrates the mathematical model of the co-traveler problem with Miller-Tucker-Zemlin conditions for the exclusion of subcycles. For the first time, a system of logic equations was proposed, which takes into account the condition of the nodes, the direction of movement, the speed and the absence of overloading. The algorithm also optimizes transportation time, which ensures increased energy efficiency and productivity of automated elevator systems.*

Practical value. *The practical value of the research lies in the possibility of introducing the developed algorithm into the automated control systems of elevator complexes to increase energy efficiency and optimize work. The proposed methodology facilitates the automated selection of routes with minimal energy consumption, whilst accounting for the technical characteristics of the equipment and the prevailing operating conditions. This contributes to the reduction of the total cost of electricity, increasing the productivity and reliability of the system, ensuring economic benefit and stable operation of the transport infrastructure.*

Key words: optimization of energy consumption, routing algorithm, elevator complex, software-logic controller, traveling salesman problem, mathematical model, automation, energy efficiency, logic equations, transport system.

REFERENCES

[1] Mardziavko, V. (2020). Analysis of the organization of equipment management for ensuring the transportation of grain products at elevators. *Environmental Engineering*, 18(4), 35–41. DOI: 10.37700/enm.2020.4(18).35-41

[2] Mardziavko V. A., Tymchuk S. O, Syrotenko M. O (2021). Increasing the efficiency of the technological process of the elevator complex through optimal routing. *Environmental Engineering*. 22(4), 82–88. DOI: 10.5281/zenodo.6964706

[3] Mardziavko V. A., & Tymchuk, S. O. (2021). Analysis of the routing method of transport and technological lines for moving grain at elevators. *In Youth and Agricultural Technology in the 21st Century* (pp. 233–234).

[4] Tymchuk, S. O., Kundenko, P. M., & Vakhonina, L. V. (2021). Analysis of grain transportation on elevators. *Bulletin of Agricultural Science of the Black Sea Region*, 4(112), 96–106. DOI:10.31521/2313-092X/2021-4(112)-10

[5] Prosianyk O. V., Prosianyk M. O., Tkachenko S. M. (2012). Promising directions for the development of automated systems at grain storage and processing enterprises. *Collection of scientific papers of the National Mining University*. 39, 128–136.

[6] Mardziavko, V. (2022). Optimality criterion of the elevator complex for increasing energy efficiency. *Analysis of modern ways of development of science and scientific discussions* (pp. 571–575).

[7] Prosianyk O. V. (2010). Application of SCADA - systems for controlling technological routes of grain transportation, *Grain storage and processing*. 4, 51–55.

[8] Dyck, G. (2023). Digital Twins: A novel traceability concept for post-harvest handling. *Smart Agricultural Technology*, (3), 2772–3755. DOI: 10.1016/j.atech.2022.100079

[9] Biliuk, I. (2023). Micromanipulator tracking system based on a piezoelectric engine. *In 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System* (pp. 1–6). DOI:10.1109/MEES61502.2023.10402375

[10] Kundenko, M.P., Mardziavko, V.A., Rudenko, A.Iu. (2024). Using criteria for optimizing the routing process of the elevator complex. *Electrical Engineering and Energy*. 4, 44–50. DOI: 10.15588/1607-6761-2023-4-5

[11] Sosnyn, K. V., Tkachenko, S. N., & Prosianyk, A. V. (2016). Automation of grain movement - the core of an integrated ACS. *Grain Storage and Processing*, 80(2), 32–40.

[12] Prosianyk, A. V., & Tkachenko, S. M. (2012). Current tasks of automation of grain storage and processing enterprises. *Grain storage and processing*, 8(158).

[13] Syrotenko, M., Mkrtumian, S., & Tymchuk, S. (2019). *Method of increasing the energy efficiency of grain processing and grain storage complexes* (Patent of Ukraine No. 130996).

[14] Syrotenko, M., Mkrtumian, S., & Tymchuk, S. (2019). *Method of improving the quality of grain transportation in grain processing and grain storage complexes* (Patent of Ukraine No. 148511).

[15] Byshevets N. H., Byshovets N. M., Boikov A. I. (2024). The problem of a traveling salesman as a universal tool for route optimization. *Scientific notes of V. I. Vernadsky TNU*. 35(1), 97-102. DOI: 10.32782/2663-5941/2024.1.1/15

[16] Bila H.D., Korchynskyi O.O., Stetsiuk P.I. (2022). Using the NEOS server to solve two classes of optimization problems. *Cybernetics and Computer Technologies*. 4, 56–81. DOI: 10.34229/2707-451X.22.4.5