

УДК 621.31
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.5.1/17>

Босак А.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кондратенко Д.А.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Тесленко О.І.

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

РОЗРОБКА ТА АНАЛІЗ ГІБРИДНОГО АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЛАНЦЮГОВОГО КОНВЕЄРА

У статті розглянуто актуальну науково-практичну задачу підвищення енергоефективності промислових конвеєрних установок, що експлуатуються в умовах переривчастих технологічних циклів. Проблема полягає в тому, що значна частина електроенергії марно витрачається під час роботи обладнання в режимі холостого ходу, коли транспортування вантажу не відбувається. Ситуація ускладнюється поширеною практикою вибору приводних асинхронних двигунів зі значним запасом потужності, що призводить до їх експлуатації з низьким коефіцієнтом завантаження. Це, в свою чергу, веде до роботи двигуна в зоні зниженого коефіцієнта корисної дії та низького коефіцієнта потужності ($\cos \phi$), що створює додаткові технічні та економічні втрати.

Метою даної роботи є комплексний аналіз існуючих та розробка нових, більш досконалих методів керування для мінімізації енергоспоживання конвеєра в реальних умовах експлуатації. Для досягнення поставленої мети розроблено математичну модель енергоспоживання, що дозволяє розраховувати миттєву та інтегральну потужність як функцію від параметрів вантажопотоку. Проведено порівняльний техніко-економічний аналіз трьох базових стратегій модернізації: заміни стандартного двигуна на енергоефективний аналог класу IE3, впровадження частотно-регульованого приводу (ЧРП) для керування швидкістю, та реалізації системи автоматичного вимкнення («Старт-Стоп»).

За результатами моделювання встановлено, що для типового циклу роботи з тривалими паузами найбільш ефективною є система «Старт-Стоп» з терміном окупності менше одного року. Однак, її недоліком є значна кількість пусків двигуна при коротких перервах у вантажопотоці. Наукова новизна роботи полягає у розробці гібридного адаптивного алгоритму керування, який інтегрує переваги ЧРП та системи «Старт-Стоп». Запропонований алгоритм при зникненні вантажу миттєво знижує швидкість конвеєра, забезпечуючи негайну економію, та лише після заданої часової затримки, переконавшись у довготривалості простою, виконує повну зупинку приводу. Такий підхід дозволяє досягти максимального енергозбереження, одночасно зменшуючи кількість пускових циклів та механічні навантаження на обладнання. Крім того, проведено аналіз чутливості, який встановив кількісну залежність економічної ефективності кожного методу від частки холостого ходу в операційному циклі та визначив точку біфуркації, після якої доцільність застосування системи «Старт-Стоп» перевищує ЧРП.

Ключові слова: енергоефективність, ланцюговий конвеєр, асинхронний привід, ЧРП, коефіцієнт завантаження, гібридний алгоритм, аналіз чутливості.

Постановка проблеми. Підвищення енергоефективності промислових підприємств є однією з ключових умов забезпечення їх конкурентоспроможності, зниження собівартості продукції та відповідності сучасним екологічним стандартам

[1, 2] Значну частку в загальному енергоспоживанні багатьох галузей, зокрема агропромислового комплексу, гірничої промисловості та логістики, займає конвеєрний транспорт. Незважаючи на конструктивну простоту, реальні режими ек-

платуації цих установок часто призводять до значних нераціональних витрат електроенергії, що створює важливу науково-технічну проблему.

Основна причина низької енергоефективності полягає в невідповідності між встановленою потужністю приводного обладнання та реальним характером його завантаження. По-перше, поширена інженерна практика передбачає вибір асинхронних двигунів зі значним запасом потужності (в 2-3 рази) для гарантованого подолання пускових моментів та можливих пікових навантажень [3]. По-друге, більшість технологічних процесів мають переривчастий характер, через що конвеєри значну частину робочого часу (до 50-70%) функціонують в режимі холостого ходу – тобто, рухаються без корисного вантажу, очікуючи на нову порцію сировини [4].

Поєднання цих двох факторів призводить до комплексу негативних наслідків. Робота двигуна зі значним недовантаженням (коефіцієнт завантаження 25-40%) переводить його в зону з низьким коефіцієнтом корисної дії та, що не менш важливо, критично низьким коефіцієнтом потужності ($\cos \phi$) [5]. Це веде не лише до прямих втрат активної енергії, а й до генерації надлишкової реактивної потужності в мережу, що збільшує навантаження на трансформатори, кабельні лінії та призводить до штрафних санкцій з боку енергопостачальних компаній. Традиційні системи керування, що базуються на прямому пуску від мережі через магнітний пускач, не здатні адаптуватися до цих змінних режимів, продовжуючи споживати значну потужність навіть за відсутності корисного навантаження.

Таким чином, виникає науково-технічна суперечність: з одного боку, для забезпечення надійності вимагається встановлення приводів із запасом потужності, а з іншого – саме цей запас при переривчастій роботі стає причиною значних енергетичних втрат. Існуючі підходи до модернізації часто є фрагментарними, вирішуючи лише частину проблеми (наприклад, заміна двигуна без зміни системи керування). Відсутній комплексний підхід до розробки системи керування, яка б адаптувалася до реального вантажопотоку в режимі реального часу, мінімізуючи енергоспоживання у всіх фазах операційного циклу.

Метою статті є розробка системи керування, яка адаптується до реального вантажопотоку в режимі реального часу, мінімізуючи енергоспоживання у всіх фазах операційного циклу. Завданням дослідження є не лише кількісна оцінка ефективності відомих методів (встановлення ЧРП,

системи «Старт-Стоп»), а й синтез нового, гібридного адаптивного алгоритму, а також визначення техніко-економічних меж (областей доцільності) застосування кожного з рішень залежно від специфіки технологічного процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема енергоефективності електромеханічних систем є комплексним, міждисциплінарним завданням синергетичного характеру, що знаходиться на стику теорії електричних машин, автоматичного керування та енергетичного менеджменту. Теоретичні аспекти електромагнітних та електромеханічних процесів в асинхронних двигунах, що є основою будь-якого дослідження їх режимів роботи, були фундаментально досліджені різними вітчизняними науковцями, серед яких Л. І. Мазуренко, Ю. М. Васьковський, О. М. Сінчук. Їхні праці заклали основи для аналізу робочих характеристик та енергетичних показників асинхронних машин, які використовуються і сьогодні.

Питання зниження енергетичних втрат безпосередньо в промислових електроприводах активно розглядаються в роботах О. П. Чорного, А. В. Садового та інших, де аналізуються структури втрат, переваги впровадження двигунів вищих класів енергоефективності (IE2, IE3, IE4) та методики проведення енергетичних аудитів. У цих дослідженнях доведено, що найбільший потенціал енергозбереження полягає не стільки у заміні самого двигуна, скільки в оптимізації системи керування ним.

Ключовою технологією для такої оптимізації є застосування частотно-регульованих приводів (ЧРП). Розвитку теорії та практики частотного керування присвячені роботи С. М. Переседи, С. М. Ковбаси. В їхніх працях детально розглянуто як прості методи скалярного керування ($U/f=\text{const}$), так і більш досконалі алгоритми векторного керування, що дозволяють підтримувати високі енергетичні показники двигуна в широкому діапазоні швидкостей та навантажень. Багато публікацій демонструють значний економічний ефект від впровадження ЧРП у насосних, вентиляторних та компресорних установках, де економія досягається за рахунок регулювання продуктивності відповідно до поточних потреб.

Однак, аналіз публікацій показує, що більшість досліджень сфокусовані на оптимізації роботи обладнання в безперервних або квазістаціонарних режимах. Проблема керування приводами, що працюють у вираженому переривчастому циклі, як-от конвеєрний транспорт на багатьох

виробництвах, залишається менш дослідженою. Застосування ЧРП у таких системах часто обмежується лише реалізацією плавного пуску або зниженням швидкості в режимі холостого ходу. Прості системи автоматизації типу "Старт-Стоп" хоч і є ефективними при довгих простоях, але не розглядаються з точки зору їх впливу на ресурс обладнання через часті пускові цикли.

Таким чином, незважаючи на велику кількість робіт у галузі енергоефективного керування, залишається відкритою задача синтезу адаптивної системи керування, яка б поєднувала переваги плавного регулювання швидкості та повної зупинки приводу, обираючи оптимальну стратегію в режимі реального часу залежно від тривалості пауз у вантажопотоці. Саме на розв'язання цієї задачі і спрямоване дане дослідження.

Виклад основного матеріалу. В якості об'єкта дослідження обрано ланцюговий скребковий конвеєр ТСЦ-100, що є типовим обладнанням для горизонтального транспортування сипучих вантажів (комбікорму, зерна) на заводах з виробництва кормів.

Вихідні дані та константи:

- Продуктивність, $Q = 50$ т/год = 13,89 кг/с.
- Довжина конвеєра, $L = 40$ м.
- Швидкість ланцюга, $v = 0,8$ м/с.
- Маса 1 м.п. тягового органу (ланцюг + скребки), $q_{\text{ланц}} = 25$ кг/м.
- Коефіцієнт тертя ланцюга по напрямних, $\mu_{\text{ланц}} = 0,2$.
- Коефіцієнт тертя вантажу по коробу, $\mu_{\text{вант}} = 0,4$.
- Прискорення вільного падіння, $g = 9,81$ м/с².
- ККД редуктора, $\eta_{\text{ред}} = 0,95$.
- ККД частотного перетворювача (ЧРП), $\eta_{\text{чрп}} = 0,97$.

Циклограма роботи (60 хвилин):

- Час роботи під навантаженням, $t_{\text{ном}} = 35$ хв = 0,5833 год.
- Час роботи вхолосту, $t_{\text{хх}} = 15$ хв = 0,25 год.
- Час простою, $t_{\text{простій}} = 10$ хв = 0,1667 год.

Необхідна механічна потужність на валу редуктора $P_{\text{мех}}$ (кВт) визначається як сума потужності холостого ходу $P_{\text{мех хх}}$ та потужності на переміщення вантажу $P_{\text{мех вантаж}}$:

$$P_{\text{мех}}(t) = P_{\text{мех хх}} + P_{\text{мех вантаж}} \cdot L(t), \quad (1)$$

де $L(t)$ – коефіцієнт завантаження конвеєра (0 або 1).

Споживана з мережі активна потужність $P_{\text{спож}}$ (кВт) розраховується з урахуванням ККД приводу:

$$P_{\text{спож}}(t) = P_{\text{мех}}(t) / (\eta_{\text{ред}} \cdot \eta_{\text{дв}}). \quad (2)$$

Розрахунки показали, що необхідна механічна потужність під номінальним навантаженням складає 5.32 кВт. При встановленій номінальній потужності двигуна 15 кВт, коефіцієнт завантаження K_z становить:

$$K_z = P_{\text{мех ном}} / P_{\text{дв ном}} = 5.32 / 15.0 \approx 0.355 \text{ або } 35\%. \quad (3)$$

Робота асинхронного двигуна при такому низькому завантаженні є вкрай неефективною. Це підтверджує, що фокусуватися слід не на номінальному ККД, а на оптимізації роботи в реальних, частково навантажених режимах.

Для порівняльного аналізу було змодельовано чотири сценарії роботи конвеєра. Базовий сценарій імітує існуючий стан, де конвеєр з двигуном класу IE1 працює безперервно протягом усього робочого періоду, включаючи час простою, що призводить до значних нераціональних витрат енергії. Сценарій 1 ("Заміна на IE3") передбачає просту заміну двигуна на аналог вищого класу енергоефективності без зміни системи керування, що забезпечує невелику економію за рахунок вищого ККД. Сценарій 2 ("Встановлення ЧРП") моделює роботу з частотно-регульованим приводом, який знижує швидкість конвеєра до мінімальної в режимі холостого ходу, суттєво зменшуючи потужність. Сценарій 3 ("Система Старт-Стоп") реалізує найбільш радикальний підхід, повністю вимикаючи привід після короткої затримки при відсутності вантажу, що забезпечує максимальну економію енергії в періоди простою.

Результати аналізу сценаріїв роботи конвеєрної представлені в табл. 1.

Проведений аналіз енергоспоживання ланцюгового конвеєра ТСЦ-100 показав, що ключовим джерелом енергетичних втрат для даної установки є не стільки номінальний ККД обладнання, скільки нераціональний режим його експлуатації. Встановлено, що значна частка електроенергії, а саме близько 20% від загального споживання, витрачається неефективно під час роботи конвеєра в режимі холостого ходу в очікуванні нової партії сировини. Таким чином, найбільш ефективними є ті заходи, що спрямовані безпосередньо на оптимізацію самого режиму роботи, а не лише на незначне підвищення ККД приводу.

Спроба вирішити проблему шляхом простої заміни існуючого двигуна на сучасний аналог класу IE3 є економічно недоцільною, оскільки не впливає на основну причину втрат і має надзвичайно довгий термін окупності (понад 11 років). Натомість, заходи, що модернізують систему керування, демонструють високу ефективність.

Результати аналізу сценаріїв роботи конвеєрної установки

Показник	Базовий варіант (двигун ІЕ1)	Сценарій 1. Заміна двигуна на ІЕ3	Сценарій 2. Встановлення ЧРП	Сценарій 3. Система "Старт-Стоп"
Основний принцип економії	-	Підвищення ККД двигуна	Зниження швидкості при роботі вхолосту	Повне виключення роботи вхолосту
Споживана потужність (Навантаження)	6,28 кВт	6,08 кВт	6,28 кВт	6,28 кВт
Споживана потужність (Холостий хід)	3,71 кВт	3,59 кВт	1,15 кВт	0 кВт
Річне споживання енергії, кВт·год	18 360	17 800	15 800	14 640
Річна економія енергії, кВт·год	0	560	2 560	3 720
Річна економія коштів, грн (при тарифі 5,5 грн/кВт·год)	0	3 080	14 080	20 460
Орієнтовні капіталовкладення, грн	-	35 000	55 000	20 000
Простий термін окупності, років	-	~11,4 років	~3,9 років	~0,98 років (11,7 міс.)

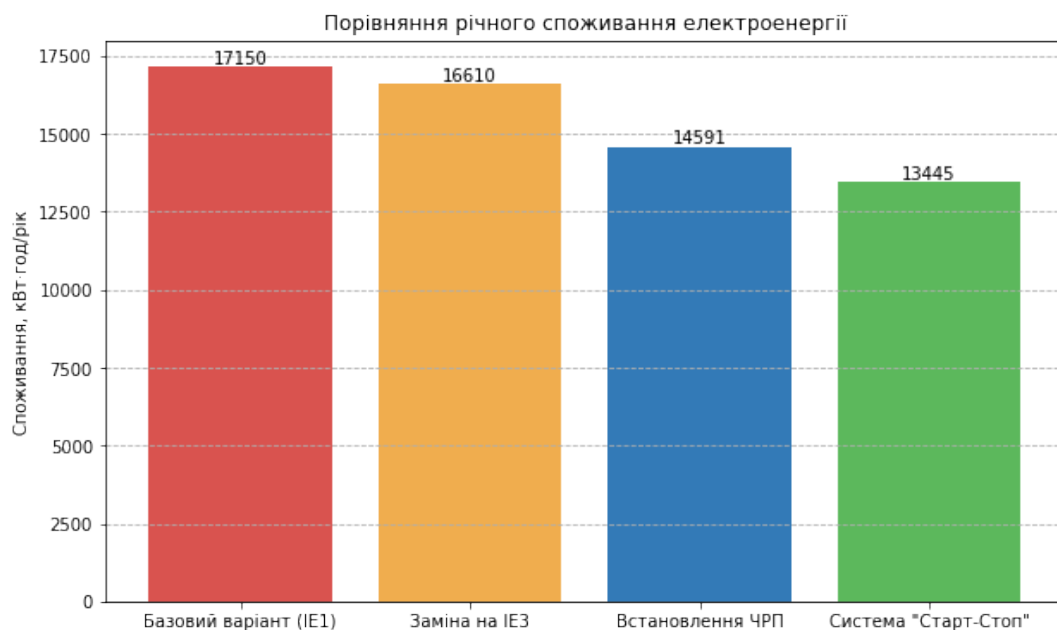


Рис. 1. Порівняння річного споживання електроенергії при запропонованих сценаріях роботи конвеєрної установки

Встановлення частотно-регульованого приводу забезпечує суттєву економію та додаткові технічні переваги, окупуючись за прийнятний термін близько 4 років.

Враховуючи отримані результати, першочерговою та найбільш економічно обґрунтованою рекомендацією є впровадження автоматизованої системи «Старт-Стоп».

З метою усунення недоліків, притаманних розглянутим окремо методам, в рамках даного

дослідження було розроблено та запропоновано гібридний адаптивний алгоритм керування. Цей алгоритм покликаний вирішити ключову суперечність: неефективність ЧРП при тривалих простоях та значну кількість пускових циклів системи «Старт-Стоп» при коротких, частих паузах у вантажопотоці. Його логіка реалізується на базі ЧРП і полягає у двофазній реакції на зникнення продукту: спочатку система негайно знижує швидкість конвеєра до мінімального рівня,

Порівняльний техніко-економічний аналіз

Показник	Заміна на ІЕЗ	Встановл. ЧРП	Старт-Стоп	Гібридний
Річне споживання, кВт·год	17776	15794	14772	14725
Річна економія, грн	3178	14076	19700	19959
Капіталовкладення, грн	35000	55000	20000	55000
Термін окупності, років	11.0	3.9	1.0	2.8

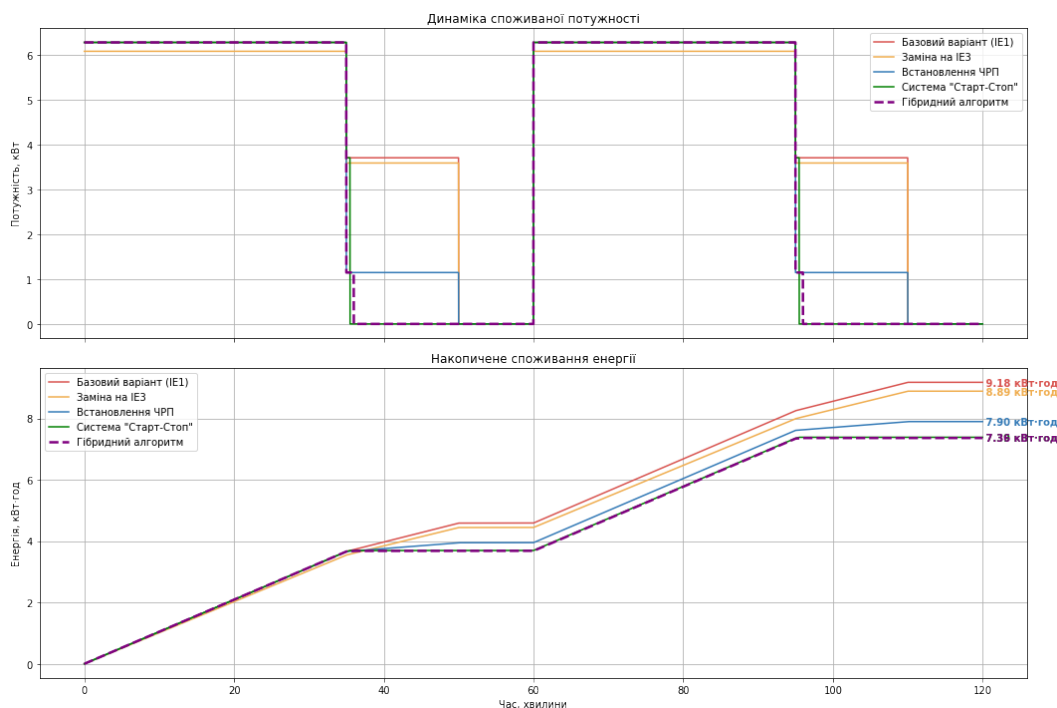


Рис. 2. Порівняльні графіки динамічної потужності та накопичення споживання енергії

забезпечуючи миттєву економію. Одночасно запускається таймер очікування. Якщо протягом заданої затримки (наприклад, 60 секунд) вантажопотік не відновлюється, система робить висновок про довготривалий простій і повністю вимикає привід, переводячи його в режим нульового споживання. Таким чином, гібридний підхід поєднує максимальну енергоефективність системи «Старт-Стоп» при довгих паузах з плавністю роботи та зменшенням кількості пусків, характерними для ЧРП, що робить його найбільш технологічно досконалим та універсальним рішенням для обладнання, що працює в умовах високої невизначеності вантажопотоку.

Порівняльний техніко-економічний аналіз всіх запропонованих методів представлений в табл. 2.

Результати динамічного моделювання, представлені на рис. 2, наочно демонструють ефективність запропонованих методів модернізації.

Верхній графік миттєвої потужності візуалізує поведінку гібридного алгоритму (пурпурна лінія),

який при зникненні вантажу спочатку знижує споживання до рівня ЧРП, а через хвилину простою – до нуля, як система «Старт-Стоп». Нижній графік накопиченої енергії підтверджує перевагу цього підходу: крива гібридного алгоритму йде практично впритул до кривої «Старт-Стоп», показуючи майже ідентичне, найнижче енергоспоживання (7.38 кВт·год за 2 години). Це доводить, що гібридний метод успішно поєднує максимальну економію при довгих простоях з технологічними перевагами плавного регулювання швидкості, що робить його найбільш універсальним та досконалим рішенням.

Висновки. У даному дослідженні було доведено, що ключовим напрямком підвищення енергоефективності конвеєрів, що працюють у переривчастому режимі, є оптимізація системи керування, а не проста заміна двигуна. На основі проведеного моделювання встановлено, що система «Старт-Стоп» є найбільш швидкоокупним рішенням, проте наукова новизна роботи полягає у розробці гібридного адаптивного алгоритму,

який поєднує переваги частотного регулювання (плавність роботи при коротких паузах) з максимальною економією повної зупинки при довгих простоях. Запропонований гібридний метод, хоч і має довший термін окупності, є найбільш тех-

нологічно досконалим та універсальним рішенням, що забезпечує високу енергоефективність та надійність в умовах змінного вантажопотоку, що і рекомендується для впровадження на підприємствах зі складною логістикою.

Список літератури:

1. Мелконова, І. В., Мелконов, Г. Л. Підвищення енергоефективності промислових підприємств. *Інноваційні технології для промисловості*. 2023. (1 (1)). <https://doi.org/10.33216/LTP-2022-1-1-1>
2. Антонів В. Моделювання механізму підвищення енергоефективності промислових підприємств. *Вісник Львівського університету. Серія економічна*. (66). С. 106–116. DOI: <http://dx.doi.org/10.30970/ves.2024.66.0.6609>
3. Василега П. О. Електропривод робочих машин: підручник / П. О. Василега. Суми : Сумський державний університет, 2022. 290 с. ISBN 978-966-657-900-6
4. Слободянюк В. К., Максимов І. І. Визначення оптимальних параметрів циклічно-потоккової технології в глибоких кар'єрах. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 2021. Том 32 (71) Ч. 2 № 2. С. 88–98. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.2-2/14>
5. Автоматизовані електромеханічні системи: конспект лекцій / укладачі: Черв'яков В. Д., Леонтьєв П. В., Соколов С. В. Суми : Сумський державний університет, 2022. 253 с.

Bosak A.V., Kondratenko D.A., Teslenko O.I. DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF A HYBRID CONTROL ALGORITHM TO IMPROVE ENERGY EFFICIENCY OF A CHAIN CONVEYOR

The article considers the current scientific and practical problem of increasing the energy efficiency of industrial conveyor systems operated in conditions of intermittent technological cycles. The problem is that a significant part of the electricity is wasted during the operation of the equipment in idle mode, when the cargo is not transported. The situation is complicated by the widespread practice of choosing to drive asynchronous motors with a significant power reserve, which leads to their operation with a low load factor. This, in turn, leads to the operation of the motor in the zone of reduced efficiency and low power factors ($\cos \varphi$), which creates additional technical and economic losses.

The purpose of this work is a comprehensive analysis of existing and the development of new, more advanced control methods to minimize the energy consumption of the conveyor in real operating conditions. To achieve this goal, a mathematical model of energy consumption has been developed that allows calculating instantaneous and integral power as a function of the parameters of the cargo flow. A comparative technical and economic analysis of three basic modernization strategies was conducted: replacing a standard engine with an energy-efficient IE3 class analogue, introducing a variable frequency drive (VFD) for speed control, and implementing an automatic shutdown system ("Start-Stop").

According to the simulation results, it was found that for a typical work cycle with long pauses, the most effective is the "Start-Stop" system with a payback period of less than one year. However, its disadvantage is a significant number of engines start during short breaks in the cargo flow. The scientific novelty of the work lies in the development of a hybrid adaptive control algorithm that integrates the advantages of the VFD and the "Start-Stop" system. The proposed algorithm instantly reduces the conveyor speed when the cargo disappears, providing immediate savings, and only after a specified time delay, making sure of the long-term downtime, performs a complete stop of the drive. This approach allows us to achieve maximum energy savings, while reducing the number of starting cycles and mechanical loads on the equipment. In addition, a sensitivity analysis was conducted, which established the quantitative dependence of the economic efficiency of each method on the share of idling in the operating cycle and determined the bifurcation point, after which the feasibility of using the Start-Stop system exceeds the VFD.

Key words: energy efficiency, chain conveyor, asynchronous drive, VFD, load factor, hybrid algorithm, sensitivity analysis.

Дата надходження статті: 08.09.2025

Дата прийняття статті: 23.09.2025

Опубліковано: 16.12.2025