

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет _____ **КОНСТРУЮВАННЯ ТА ДИЗАЙНУ** _____

ПОГОДЖЕНО

Декан факультету

конструювання та дизайну

(назва факультету (ННІ))

„ (підпис) Іван РОГОВСЬКИЙ (ПІБ)
_____ 2026р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

конструювання машин і обладнання

(назва кафедри)

„ (підпис) Вячеслав ЛОВЕЙКІН (ПІБ)
_____ 2026р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему

**ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ ПУСКУ СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА
ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ ЗЕРНОВИХ МАТЕРІАЛІВ**

Спеціальність _____ 133 – Галузеве машинобудування _____
(код і назва)

Освітня програма Машини та обладнання сільськогосподарського виробництва
(назва)

Орієнтація освітньої програми _____ освітньо-наукова _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

Д.Т.Н., професор
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Вячеслав Сергійович ЛОВЕЙКІН
(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

Д.Т.Н., професор
(науковий ступінь та вчене звання)

К.Т.Н., ст. викладач.
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

(підпис)

Вячеслав Сергійович ЛОВЕЙКІН
(ПІБ)

Іван Олександрович КАДИКАЛО
(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Володимир Миколайович КОЛЄСНІКОВ
(ПІБ студента)

КИЇВ – 2026

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет КОНСТРУЮВАННЯ ТА ДИЗАЙНУ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

конструювання машин і обладнання

д.т.н., професор _____ Вячеслав ЛОВЕЙКІН
(науковий ступінь, (підпис) (ПІБ)
вчене звання)

“17” грудня 2024 року

З А В Д А Н Н Я

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Колєснікову Володимирі Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 133- Галузеве машинобудування

(код і назва)

Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи **ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ ПУСКУ
СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ ЗЕРНОВИХ МАТЕРІАЛІВ**

затверджена наказом ректора НУБіП України від “16” грудня 2024р. № 2268“С”

Термін подання завершеної роботи (проекту) на кафедру 04.05.2026

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи Технологічна схема застосування
стрічкового конвеєра, технічні, геометричні та конструктивні параметри стрічкового
конвеєра та його механізмів.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Провести аналіз існуючих конструкцій та огляд сучасних методів моделювання та оптимізації режиму пуску стрічкового конвеєра
2. Розглянути перспективи створення нових конструкцій, провести аналіз динамічних досліджень та досліджень присвячених оптимізації стрічкових конвеєрів
3. Оптимізувати режим пуску стрічкового конвеєра
4. Розглянути питання охорони праці при роботі стрічкових конвеєрів
5. Виконати розрахунок економічної ефективності використання стрічкових конвеєрів

Дата видачі завдання “17 грудня 2024 р.

**Керівник магістерської
кваліфікаційної роботи**

_____ Вячеслав Сергійович ЛОВЕЙКІН
(підпис) (прізвище та ініціали)

_____ Іван Олександрович КАДИКАЛО
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____ Володимир Миколайович КОЛЄСНІКОВ
(підпис) (прізвище та ініціали студента)

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота на тему: «Оптимізація режиму пуску стрічкового конвеєра при транспортуванні зернових матеріалів».

У роботі проведено аналіз (огляд) конструктивних особливостей, класифікація та технічні характеристики стрічкових конвеєрів та їх елементів, режими керування. Проведено огляд літературних джерел присвячені динамічним дослідженням, а також розглянуто праці присвячені оптимізаційним дослідженням роботи стрічкових конвеєрів.

Проведено динамічний аналіз руху стрічкового конвеєра, побудовано динамічну та математичну моделі руху стрічкового конвеєра та отримані графічні залежності кінематичних та силових характеристик.

Виконана оптимізація режиму пуску за критерієм середньоквадратичного значення пружного моменту в приводі стрічкового конвеєра та отримані графічні залежності кінематичних та силових характеристик при оптимальному режимі пуску стрічкового конвеєра.

Окремо розглянуто питання охорони праці під час роботи стрічкового конвеєра та проведено розрахунок економічної ефективності, оптимізованої конструкції стрічкового конвеєра при транспортуванні зернових матеріалів.

Ключові слова: стрічковий конвеєр, елеватор, АПК, динаміка, оптимізація, динамічна модель, навантаження, барабан, привод, зерно, безпека, економічна ефективність.

ЗМІСТ

Реферат.....	3
Зміст.....	4
Вступ.....	5
Розділ 1. Огляд конструкцій та динамічних й оптимізаційних досліджень стрічкових конвеєрів.....	7
1.1 Аналіз конструктивних особливостей, класифікація та технічні характеристики стрічкових конвеєрів	7
1.2 Динамічні дослідження стрічкових конвеєрів.....	19
1.3 Оптимізаційні дослідження стрічкових конвеєрів.....	29
Розділ 2. Динамічний аналіз стрічкового конвеєра.....	39
2.1 Динамічна модель стрічкового конвеєра.....	39
2.2 Математична модель стрічкового конвеєра.....	43
2.3 Результати динамічного аналізу стрічкового конвеєра.....	45
Розділ 3. Оптимізація пуску стрічкового конвеєра.....	47
3.1 Вибір критерію оптимізації режиму пуску стрічкового конвеєра.....	47
3.2 Оптимізація режиму пуску стрічкового конвеєра	48
3.3 Результати оптимізації режиму пуску стрічкового конвеєра.....	50
Розділ 4. Охорона праці під час роботи стрічкового конвеєра.....	52
Розділ 5. Економічна ефективність.....	59
Висновки.....	63
Список використаних джерел.....	64
Додатки.....	82

ВСТУП

Стрічкові конвеєри є основним засобом механізованого транспортування зернових матеріалів у сільському господарстві, елеваторних комплексах, на переробних підприємствах та у портових терміналах. Висока продуктивність, надійність та енергоефективність роботи конвеєрів значною мірою залежать від правильного вибору та оптимізації режиму пуску. Неврегульовані режими пуску можуть призводити до значних механічних навантажень, пробуксовки стрічки, перевантаження приводу та передчасного зносу елементів конвеєрної системи.

Забезпечення плавного пуску стрічкового конвеєра дозволяє зменшити динамічні навантаження, підвищити енергоефективність та продовжити термін експлуатації обладнання. Оптимізація цього процесу є важливим завданням для підвищення продуктивності зернових логістичних систем та зниження експлуатаційних витрат.

Актуальність теми полягає в тому, що зростання обсягів транспортування зернових культур потребує вдосконалення конвеєрних систем, що працюють у змінних умовах навантаження. Некерований пуск призводить до підвищеного споживання електроенергії, зниження ресурсу механічних компонентів і небезпеки аварійних ситуацій. Впровадження систем керування сприяє мінімізації динамічних навантажень і коливань натягу стрічки під час пуску стрічкового конвеєра, що дозволяє запобігти травмуванню зернової сировини, знизити знос тягового органу та забезпечити енергоефективність конвеєрних ліній.

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є оптимізація режиму пуску стрічкового конвеєра при транспортуванні зернових матеріалів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

Провести аналіз існуючих конструкцій та огляд сучасних методів моделювання та оптимізації режиму пуску стрічкового конвеєра

Розглянути перспективи створення нових конструкцій, провести аналіз динамічних досліджень та досліджень присвячених оптимізації стрічкових конвеєрів

Оптимізувати режим пуску стрічкового конвеєра

Розглянути питання охорони праці при роботі стрічкових конвеєрів

Виконати розрахунок економічної ефективності використання стрічкових конвеєрів

Об'єкт дослідження – процес руху стрічкового конвеєра.

Предмет дослідження – закономірності руху стрічкового конвеєра, що мінімізують динамічні навантаження та параметри керування, що впливають на ефективність і плавність його руху при транспортуванні зернових матеріалів.

Методи дослідження – теретичної та аналітичної механіки, диференціального та інтегрального числення, аналітичне та математичне моделювання, динамічний аналіз та чисельні методи оптимізації.

Практична значущість роботи полягає у можливості застосування отриманих результатів для вдосконалення алгоритмів керування, підвищення ефективності роботи стрічкових конвеєрів при переміщенні зернових матеріалів, підвищення надійності та безпеки експлуатації в галузі агропромислового комплексу та машинобудування.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД КОНСТРУКЦІЙ ТА ДИНАМІЧНИХ Й ОПТИМІЗАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА

1.1 Аналіз конструктивних особливостей, класифікація та технічні характеристики стрічкових конвеєрів

Забезпечення стабільного та ефективного функціонування сучасних агропромислових підприємств, перевалочних комплексів і портових зернових терміналів безпосередньо залежить від показників експлуатаційної надійності та продуктивності встановленого транспортного обладнання. Важливе місце в інфраструктурі зерносховищ (Рис. 1.1. – 1.2.) посідають стрічкові конвеєри. Вони здатні формувати безперервні потоки сипких вантажів при відносно низьких питомих витратах енергії на одиницю маси [1]. У контексті розвитку вітчизняного галузевого машинобудування та автоматизації, що спирається на сучасну методичну та інженерну базу, особливого значення набуває дослідження перехідних режимів з метою зниження динамічних зусиль в елементах машин [2]. Проблема наукового обґрунтування та покращення (оптимізації) режиму пуску тягового контуру при переміщенні зерна зумовлена жорсткими вимогами до збереження цілісності насіннєвого матеріалу, схильного до травмування під впливом різких імпульсних впливів. Запобігання виникненню пікових навантажень під час пуску дозволяє суттєво мінімізувати втомне зношування дороговартісних стрічок, зменшити пікові стрибки струму в електричній мережі та мінімізувати напруження в механічних передачах привода [2].

Сучасні інженерні стандарти, що висуваються до технологічного обладнання високопродуктивних зернових комплексів, вимагають не лише високих швидкісних та об'ємних показників, які на потужних терміналах можуть сягати 1000 т/год, а й високої адаптивності всієї електромеханічної системи до складних умов експлуатації [3, 4].



Рис. 1.1. Стартовий елеватор



Рис. 1.2. Склад зберігання

До специфічних деструктивних чинників у даному випадку належать підвищена запиленість повітряного середовища та вибухонебезпечність робочих зон елеватора. Прямий пуск широко поширених асинхронних двигунів супроводжується миттєвим зростанням пускового моменту, що ініціює хвилеподібні процеси та нелінійні коливання у гнучкому органі [2, 5]. Такі перехідні процеси часто призводять до короткочасного пробуксовування стрічки на приводному барабані, що в умовах закритого простору зерносховищ створює критичний ризик іскроутворення та займання пилоповітряної суміші [6]. Таким чином, поглиблений інженерний аналіз кінематики робочих органів та динамічне моделювання пускових режимів виступають науковою основою для синтезу алгоритмів керованого розгону, здатних забезпечити плавний перехід механізму від стану спокою до номінальної робочої швидкості.

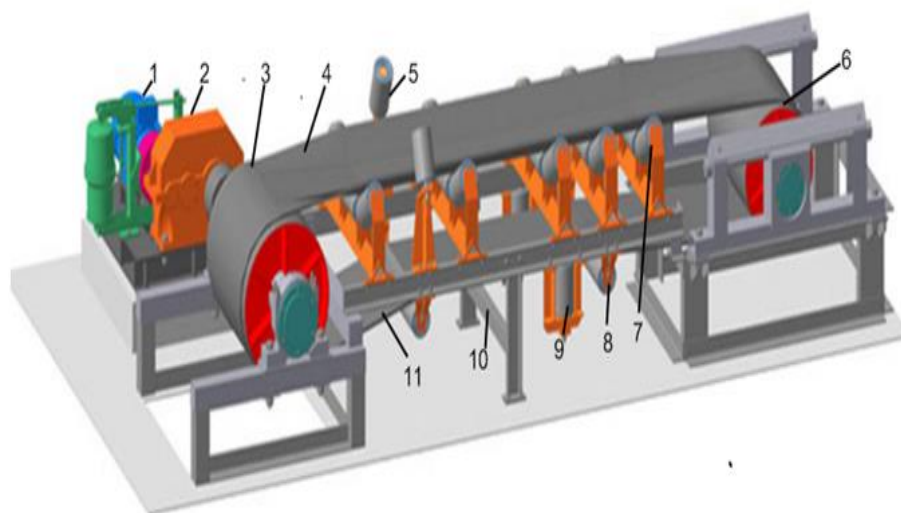


Рис. 1.3. Будова стрічкового конвеєра : 1-приводний електродвигун, 2-редуктор приводу, 3-приводний барабан; 4-робоча стрічка конвеєра, 5-ролики проти сходу для робочої стрічки; 6-натяжний барабан, 7-підтримуючі ролики для робочої стрічки; 8-підтримуючі ролики для холостої стрічки, 9-ролики проти сходу для холостої стрічки, 10-конвеєрний став, 11-холоста стрічка конвеєра

У агропромисловому комплексі (АПК), вчасності зернопереробній галузі використовується широкий спектр транспортуючих машин, що відрізняється геометричною конфігурацією лінії, ступенем мобільності та особливостями взаємодії робочих органів із вантажем [7]. Основний тип у забезпеченні магістральних ліній, це стаціонарні стрічкові конвеєри з підтримуючими роликами (Рис. 1.4. – 1.5.), які змонтовані на жорстких несучих рамах із гнутого металевого профілю [8]. Такі конструкції забезпечують високу стійкість руху та стабільність просторової траєкторії стрічки на дистанціях в сотні метрів, мінімізуючи опір руху за рахунок оптимального розподілу роликоопор [1, 9]. Промислові зразки сучасного елеваторного обладнання демонструють чітку тенденцію до впровадження модульних уніфікованих секцій рами, що дає змогу швидко проводити модернізацію або змінювати лінійні параметри лінії стрічкового конвеєра без повної зміни несучого каркаса всієї транспортної системи [8].



Рис.1.4. Стрічковий конвеєр з підтримуючими роликами



Рис.1.5. Стрічковий конвеєр відкритого типу ZEO-BC

Таблиця 1.1. Характеристика стрічкового конвеєра

Характеристика конвеєра	Роликовий (тип У13-ТЛ)	Безроликовий (жолобчастий)	Мобільний (ZEO-BC-RM)
Тип опорного пристрою	Роликоопори (трироликові)	Суцільний сталевий жолоб	Опорні ролики на рамі
Максимальна швидкість стрічки, м/с	До 3,2	До 1,5-2,0	До 2,5
Продуктивність, т/год	100 – 1000	50 – 200	20 – 150
Кут нахилу без шевронів, град	До 18 – 20	До 15	До 25 (регульований)
Основна перевага	Низький опір руху	Мінімальне травмування зерна	Маневреність у межах складу

Інший тип стрічкових конвеєрів більше адаптований під екологічні вимоги та стандарти енергоефективності і представляється закритими (коробчатими) та трубчастими конвеєрами [4, 10]. Герметичний корпус таких установок повністю

ізолює сипкий вантаж, унеможливаючи просипання зерна, виділення дрібнодисперсного пилу в робочі зони елеватора та захищаючи продукт від негативного впливу атмосферних опадів на відкритих майданчиках (естакадах) [4, 11]. У крутопохилих ділянках транспортуючих ліній закриті конвеєри часто комплектуються спеціалізованими шевронними стрічками або полотнами з гофробортами, що дозволяє нарощувати кут підйому матеріалу, хоча для стабільного транспортування стандартного дрібнонасінневого потоку найбільш раціональними залишаються кути нахилу в межах 15-18° [11]. Для гнучкого забезпечення внутрішньоскладських технологічних операцій, зокрема формування буртів або завантаження автотранспорту безпосередньо з підлоги, використовуються мобільні (пересувні) конвеєрні агрегати, які оснащені автономним колісним шасі та гідравлічними механізмами зміни висоти вивантаження [7, 12].



Рис. 1.6. Стрічковий конвеєр закритого типу

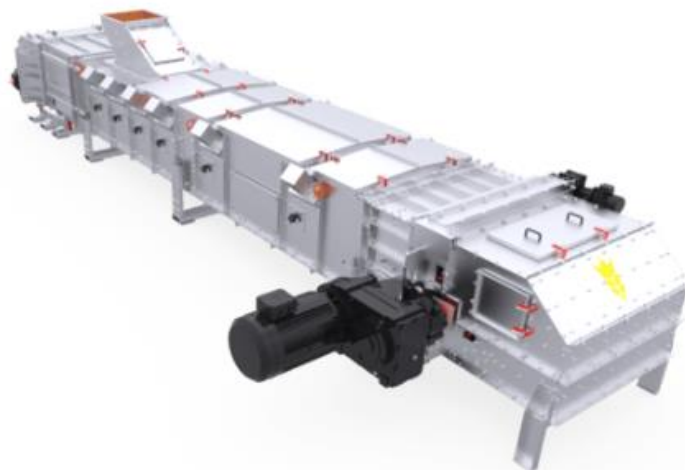


Рис. 1.7. Стрічковий конвеєр закритого типу ZEO-VCE



Рис. 1.8. Мобільний стрічковий конвеєр ZEO-BC-RM

Функціонування стрічкового конвеєра базується на принципі передачі потужності від приводу до тягового органу через сили тертя, що виникають у зоні контакту між стрічкою та приводним барабаном [13]. До складу сучасного приводного механізму входить електродвигун, понижуючий редуктор, який підбирається за критеріями номінальної потужності, крутного моменту та передаточного числа [14]. Перевага віддається конічно-циліндричним мотор-редукторам, які монтуються безпосередньо на приводний вал за допомогою шліцевого вала та муфти, що дозволяє повністю виключити проміжні пасові чи ланцюгові передачі та значно спростити центрування електромеханічної системи [14].

В стрічкових конвеєрах використовують пристрої плавного пуску та обмеження моменту, оскільки значна механічна інерція багатомасової системи завантаженого конвеєра створює суттєві динамічні перешкоди під час перехідних процесів [15]. На ділянках великої протяжності раціональним є впровадження гідродинамічних муфт, що встановлюються між валом двигуна та вхідним валом редуктора [16]. Передача кінетичної енергії в таких пристроях реалізується за рахунок циркуляції робочої рідини (оливи), що дозволяє ротору двигуна безперешкодно досягати номінальних обертів при мінімальному

пусковому струмі, плавно залучаючи до руху редуктор і приводний барабан у міру заповнення робочої порожнини муфти [16]. Подібна гідродинамічна схема ефективно демпфує крутильні коливання та захищає привід від пікових навантажень при раптовому заклинюванні, проте, на відміну від перетворювачів частоти, вона не забезпечує можливості точного регулювання кінематичних параметрів у процесі усталеного руху.

Для підвищення фрикційних властивостей та мінімізації проковзування робоча поверхня приводного барабана піддається футеруванню шляхом нанесення еластичного гумового або поліуретанового покриття з шевронним чи ромбоподібним рифленням [17]. Дане конструктивне рішення суттєво підвищує фрикційні характеристики пари «барабан – стрічка» та забезпечує ефективне відведення вологи й випадкових часток зернового пилу з зони контакту, що важливо при переміщенні вологої сировини або за умов інтенсивної конденсації всередині закритих приміщень [18]. Застосування виносних підшипникових вузлів із зовнішнім монтажем та оптимізованою системою ущільнень дозволяє здійснювати регламентне технічне обслуговування й заміну мастила без демонтажу захисних кожухів, що помітно знижує трудомісткість експлуатаційних робіт та підвищує загальну готовність обладнання до безперервної роботи [19].

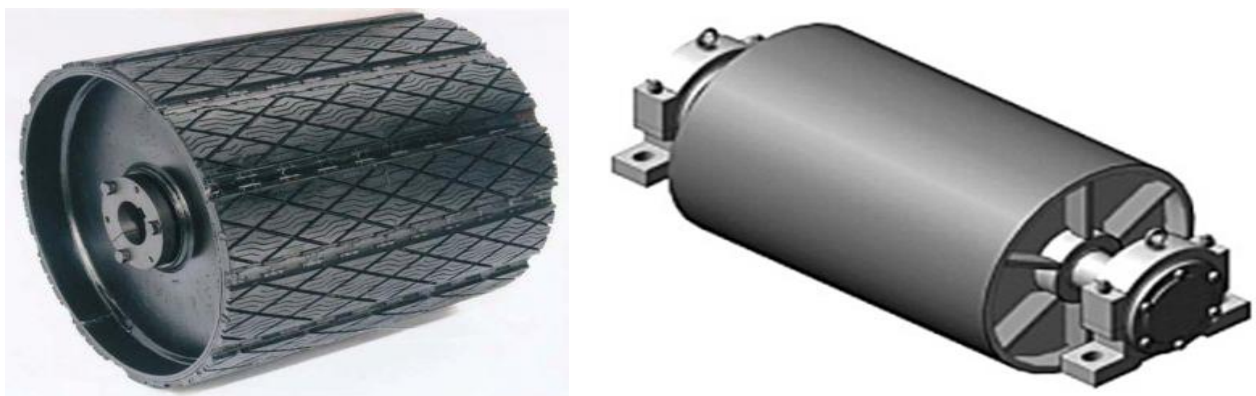


Рис. 1.9. Приводні барабани

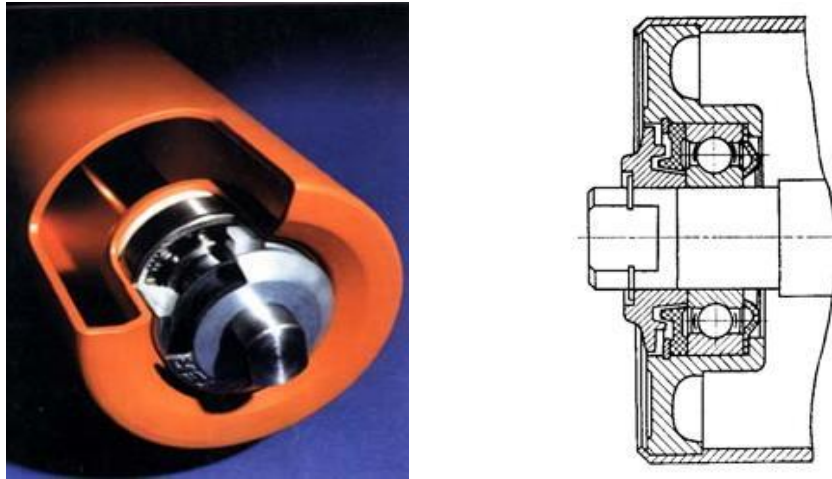


Рис. 1.10. Підшипниковий вузол ролика

Розробка оптимального режиму пуску, являє собою інженерне завдання, рішення якого спрямоване на забезпечення стабільного прискорення тягового органу (стрічки) за законом, що мінімізує виникнення поздовжніх пружних хвиль та ударних навантажень. Найбільш економічним і технічно доступним методом обмеження пускових струмів для транспортних систем малої та середньої потужності є використання пристроїв м'якого пуску, що реалізують фазове регулювання напруги при пуску двигуна [15, 20]. Завдяки контрольованому та плавному наростанню амплітуди напруги, параметри пускового моменту двигуна збільшуються поступово, що дозволяє розтягнути режим розгону до 10–20 секунд, протягом яких безвividно вибираються зазори в зачепленнях редуктора та плавно стабілізується натяг стрічки [15, 20].

Таблиця 1.2. Типи пуску стрічкового конвеєра

Метод пуску	Технічна реалізація	Вплив на механіку	Енергоефективність
Прямий (DOL)	Контакторне вмикання	Ударні навантаження, ризик обриву	Низька (пікові струми 6-8 In)
Пристрій м'якого пуску	Тиристорний регулятор	Плавний розгін, обмеження моменту	Середня (тільки при пуску)
Частотний привід (VFD)	Інвертор (AC-DC-AC)	Повний контроль швидкості та моменту	Висока (регулювання під навантаження)
Гідромуфта	Гідродинамічна передача	Механічне демпфування	Середня (втрати на ковзання)

Для довгих та розгалужених конвеєрних ліній, де лінійні розміри перевищують 50–70 метрів, а щільність завантаження стрічки зерном може нерівномірно змінюватися вздовж лінії, найбільш технологічним є впровадження частотно-регульованого електропривода [15, 20]. Частотний перетворювач забезпечує формування S-подібного закону керування швидкістю, при якому прискорення в початковій та фінальній фазах пуску мінімальне, що мінімізує появу небезпечних хвиль натягу в акумулюючих енергію ділянках стрічки [15]. Крім цього, використання частотних регуляторів дозволяє реалізувати режим, необхідний для проведення сервісного візуального моніторингу стану стиків стрічки, а також забезпечує точну координацію та синхронізацію роботи кількох приводних одиниць у багатомоторних системах, виключаючи завали у вузлах перевантаження. Інженерні спостереження показують, що впровадження частотного регулювання збільшує ресурс стрічки, підшипників та роликпопору на 30–40% за рахунок мінімізації динамічних ударів (навантажень).

Показники продуктивності роботи стрічкового конвеєра, процесу транспортування зернових матеріалів та довговічність конвеєра в цілому визначається технічним рівнем виконання його робочих органів (вчасності конвеєрна стрічка) це найбільш дорогий елемент. В агропромисловому комплексі доцільно використовувати багат шарові стрічки з тканинним каркасом типу EP (поліефір-поліамід), які поєднують низьке відносне пружне подовження з високою стійкістю до поздовжніх розривів та механічних пошкоджень [21]. Відповідно до чинних галузевих стандартів і правил безпеки, стрічки для переміщення зерна повинні мати маслостійке виконання через постійний контакт із рослинними жирами сировини, а також мати стабільні антистатичні властивості, що регулярно перевіряється шляхом вимірювань питомого електричного опору покриття [21, 22].

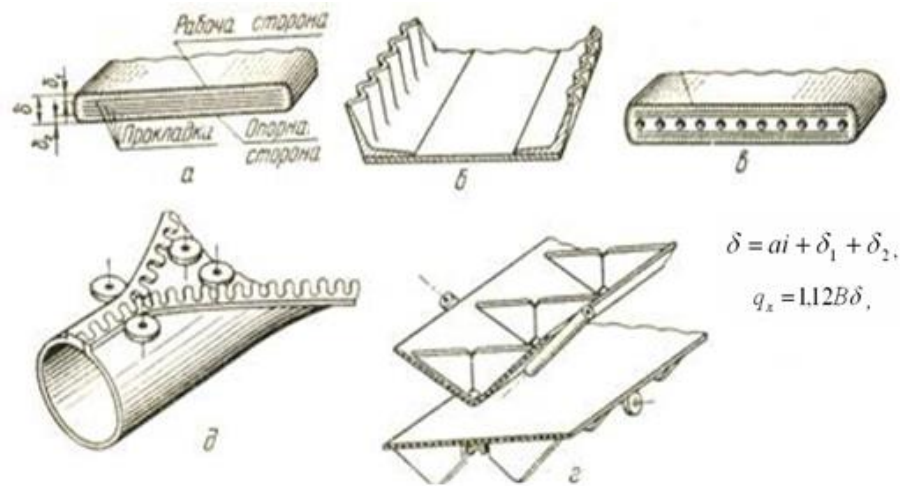


Рис 1.11. Конструкції стрічок: а – поперечний переріз; б – стрічка з бортами; в – зі сталевими тросами; г – з перегородками; д – із замком

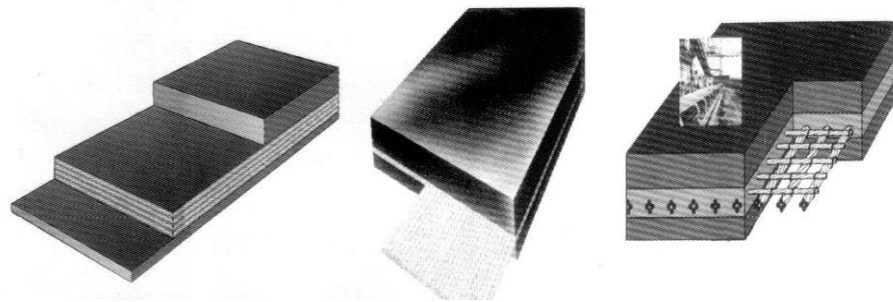


Рис. 1.12. Конструкції конвеєрних стрічок (гумовотканинні та гумовотросові)

Таблиця 1.3. Параметри стрічки стрічкового конвеєра

Параметр стрічки	Значення для типу ЕР-400/3	Призначення
Кількість прокладок каркаса	3–5	Забезпечення розривної міцності
Товщина робочої обкладки, мм	3,0 – 4,5	Захист від стирання зерном
Товщина ходової обкладки, мм	1,5 – 2,0	Захист від тертя об ролики
Міцність на розрив, Н/мм	400 – 1250	Сприйняття тягового зусилля
Температурний режим, °С	-25... +60	Робота в неопалюваних галереях

Просторовий жолобчастий профіль стрічки формується за допомогою трироликів або двороликових опор, причому для насипних зернових вантажів найбільш поширеними є кути нахилу бічних роликів, що становлять 20°, 30° чи 45° [1, 23]. Збільшення кута нахилу бічних роликів впливає на площу

поперечного перерізу порції вантажу та підвищує продуктивність конвеєра при незмінній ширині полотна, однак це приводить до концентрації згинальних напружень у зонах перегину тканинного каркаса, вимагаючи застосування більш еластичних стрічок [23]. На сучасних елеваторах застосовуються ролики з підвищеним рівнем лабіринтного пилозахисту, внутрішня порожнина підшипників яких заповнюється мастилом на весь термін експлуатації, що мінімізує потребу у періодичному сервісному обслуговуванні сотень опорних елементів на лінії стрічкового конвеєра [8].

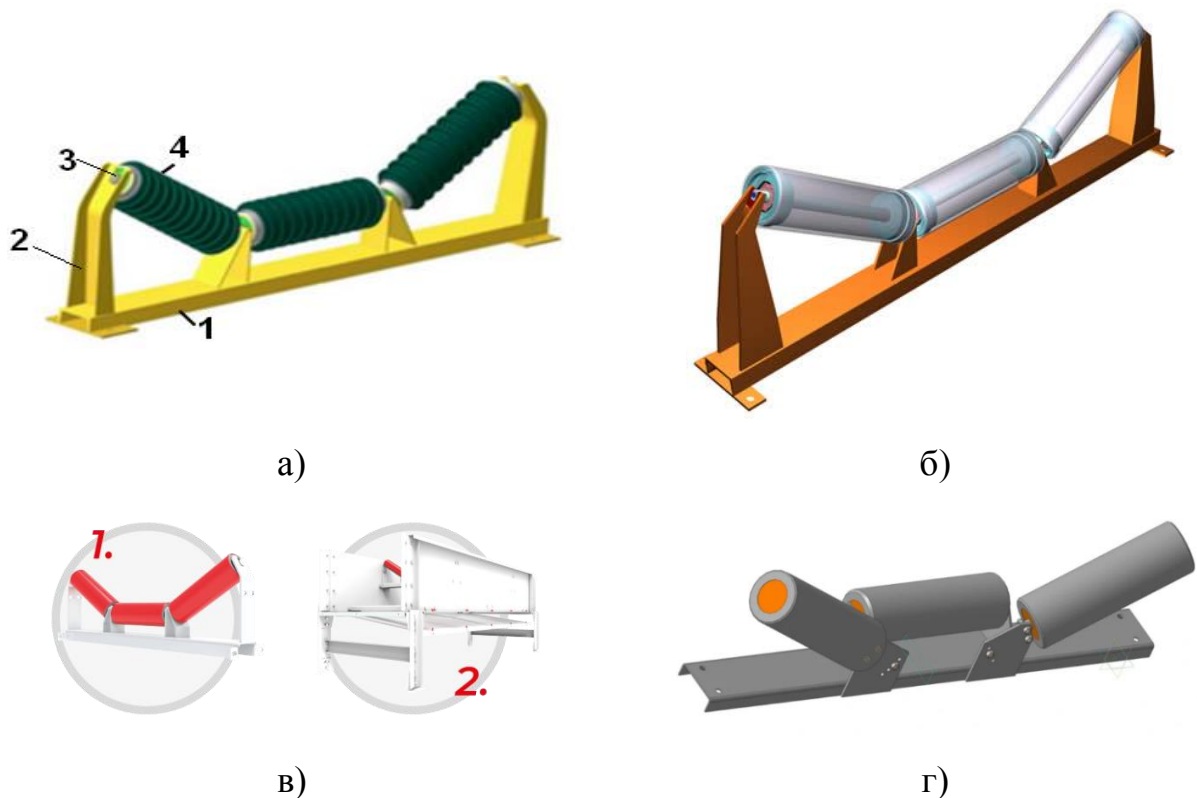


Рис. 1.13. Загальний вигляд конструкцій роликів опор:

- а) з гумовими футерованими роликами; 1 – основа; 2 – кронштейн кріплення;
3 – паз кріплення; 4 – підтримуючий ролик.
б) з гладкими поверхнями роликів; в, г) вигляд трьохроликів опор

Тягове зусилля та обмеження провисання стрічки між роликоопорами забезпечується за допомогою натяжних механізмів, що створюють початковий натяг стрічки в зоні збігання з приводного барабана. На відносно коротких конвеєрних лініях протяжністю до 20–30 метрів конструктивно виправданими є гвинтові натяжні пристрої, які встановлюються на хвостовій частині конвеєра з

ручним або механізованим переміщенням каретки барабана [8, 9]. У конвеєрах великої довжини використовуються автоматичні вертикальні або горизонтальні вантажні (гравітаційні) натяжні пристрої, спроможних підтримувати постійне натяжне зусилля незалежно від динамічних деформацій гнучкого органу під час пуску, що забезпечує захист системи від пробуксовування під час перехідних режимів [9].



Рис. 1.14. Гвинтовий натяжний пристрій



Рис. 1.15. Гравітаційний натяжний пристрій

Проведений системний аналіз конструктивних особливостей, кінематичних схем привода та робочих органів стрічкових конвеєрів для зерна свідчить про те, що довговічність та експлуатаційна надійність стрічкового конвеєра, як багатомасової пружно-дисипативної системи прямо залежать від точності параметрів натяжних пристроїв та фрикційних характеристик приводних барабанів, що у поєднанні з використанням антистатичних стрічок гарантує безпечну роботу. Впровадження частотно-регульованих приводів та електронних пристроїв плавного пуску дозволяє мінімізувати поздовжні

динамічні удари, зменшити втому каркаса стрічки та інтегрувати обладнання в загальну мережу автоматизованого керування елеваторним комплексом АПК.

1.2. Динамічні дослідження стрічкових конвеєрів

Під час процесу пуску стрічкових конвеєрних систем, які призначені для переміщення сипких зернових матеріалів, виникають інтенсивні коливальні процеси та суттєві коливання натягу, що зумовлюють до необхідності вивчення динамічних параметрів тягового контуру. Враховуючи високу вартість стрічки, яка є найвідповідальнішим елементом конвеєра стрічкового, запобігання виникненню граничних (пікових) навантажень під час розгону виступає важливим завданням для забезпечення довговічності обладнання [31, 32]. Сучасні підходи до аналізу таких систем базуються на використанні нелінійних математичних моделей, в яких стрічка розглядається, як багатомасова (одно-, дво-, три- чи більше масова) пружно-дисипативна структура, яка описується за допомогою моделі Кельвіна-Фойгта або елемента Максвелла [33, 34].

Досліджуючи функціонування конвеєрів, науковці відзначають, що динамічні напруження, які виникають внаслідок різкої зміни швидкості або нерівномірності завантаження зерновим потоком, можуть перевищувати допустимі значення, чим викликати передчасний зношування механічних вузлів [35]. Шляхом застосування асимптотичного наближення моделі Максвелла встановлено, що при високих частотах поздовжніх коливань поведінка матеріалу стрічки наближається до закону Гука, тоді, як у низькочастотних діапазонах суттєву роль відіграють процеси релаксації напружень [36]. Експериментальні дані в роботах [34, 37] підтверджують, що швидкість поширення пружних хвиль у тяговому органі безпосередньо залежить від рівня завантаження конвеєра та фізико-механічних характеристик стрічки таких, як товщини та структури корду.

У статті [38] дослідили, що режим розгону вимагає інтеграції електромеханічних параметрів привода у загальну динамічну систему. У цій статті [31] враховано вплив конвеєрної стрічки, як в'язкопружного елемента, де перехідні процеси в похилих ділянках лінії протікають більш інтенсивно

порівняно з горизонтальними секціями, а величина відносного подовження може сягати 1,16% від загальної довжини.

Аналіз поперечних коливань стрічки, як методу непрямого вимірювання натягу демонструє, що вибір математичної моделі залежить від конструктивних параметрів, зокрема кроку роликоопор. При відстані між опорами менше 1,6 м доцільно застосовувати модель пружної балки, тоді як при більших прольотах поведінка системи точніше описується моделлю гнучкої струни [39]. Для середньо навантажених конвеєрів, що працюють із зерновими матеріалами, застосування методології поверхні відгуку (RSM) дозволяє визначити оптимальні пускові параметри, що в свою чергу забезпечують точність прогнозування деформацій на рівні 94,3% [40]. В роботах [41, 42] зазначається, що спеціалізовані візкові структури, які замінюють традиційні роликоопори, вимагають додаткового врахування нелінійного контакту за Герцом для мінімізації вібрацій при проходженні стиків рейок.

Розрахункові дослідження, в статті [43], натягу на набігаючій та збігаючій гілках приводного барабана вказують на суттєве зниження динамічних зусиль при впровадженні частотного регулювання, що обмежує пусковий момент у межах безпечних значень. Автори в роботах [44, 45] дослідили, що ефективна стабілізація руху зернового потоку та мінімізація втрат енергії на деформацію стрічки досягається шляхом формування трапецієподібних або S-подібних кривих розгону, які мінімізують резонансні частотні характеристики механічної підсистеми.

В роботі [46] наводиться метод контролю натягу, що базується на аналізі частотних характеристик поперечних коливань гумотросової стрічки, що дозволяє коригувати параметри пускового моменту при зміні щільності зернового потоку.

Використовуючи реологічні моделі, наприклад триелементну модель Максвелла, автори роботи [47] встановили функціональні залежності модулів пружності та коефіцієнта в'язкості від температури навколишнього середовища, це дозволяє прогнозувати опір коченню з урахуванням швидкості стрічки та

геометричних параметрів роликів. В роботі [48] проведені експериментальні дослідження з динамічного стиснення за варіативних температур, що дозволили встановити параметри чотиризмінної термо-в'язкопружної моделі, яка слугує основою для розрахунку енергозберігаючих режимів роботи.

При аналізі нестационарних режимів, таких, як пуск або гальмування, важливого значення набувають поздовжні динамічні напруження, поширення яких вздовж лінії описується рівнянням для матеріалу, що відповідає моделі Максвелла [49]. Це теоретичне положення дозволяє спрощувати математичне моделювання перехідних процесів без втрати точності при оцінці максимальних (пікових) навантажень, що виникають у момент подачі пускового моменту на приводний барабан.

У роботі [50] пропонується, для підвищення ефективності підтримуючих систем, впровадження інноваційних ковзаючих елементів на основі спеціальних гумових сумішей. Вони характеризуються високою жорсткістю та низькою термічною чутливістю, що виявлено за допомогою динамічного механічного аналізу (DMA) у роботі [50]. Визначення параметрів конститутивної моделі гумотросової стрічки потребує врахування нелінійного впливу амплітуди завантаження, так як, в статті [51] зазначається, що в'язкість матеріалу змінюється нерівномірно при коливаннях маси зернового потоку і при цьому застосування методів апроксимації рядами Фур'є для обробки експериментальних даних дозволило уточнити коефіцієнти в'язкопружності, що є необхідною умовою для забезпечення стійкості руху при великих швидкостях транспортування сипких матеріалів стрічковим конвеєром [51].

У роботі [52] наведено дослідження точного вимірювання мінімізації (заспокоєння) напружень у гумі при високих ступенях деформації, які є типовими для реальної експлуатації конвеєрів. У статті [53] розроблено узагальнену математичну модель, в якій оболонка (стрічка) моделюється, як стандартне тверде тіло, а сталевий корд – як елемент Кельвіна, у середовищі Matlab, яка також верифікована шляхом порівняння теоретичних та експериментальних кривих навантаження.

У статті [54] наведені результати промислових випробувань, модернізація конструкції роликоопор (перехід від стандартного N-типу до вдосконаленого C-типу), що забезпечує помітне зниження споживання потужності привода конвеєра. Також були враховані не лише статичні показники, а й динамічний опір обертанню роликів, оскільки ці параметри безпосередньо впливають на загальний тяговий розрахунок системи в перехідних режимах роботи [54].

В статті [55] наведений аналіз пов'язаний з опором вдавлюванню, який суттєво залежить від в'язкопружних властивостей гумової оболонки стрічки та температурних умов експлуатації. В цій роботі за допомогою чисельного моделювання та ідентифікації модулів пружності через ряди Фур'є встановлено, що при зниженні температури нижче 10 °C спостерігається стрімке зростання опору коченню, тоді, як вплив швидкості стрічки на цей параметр залишається відносно слабким [55]. Дослідження в яких враховується еластичність стрічки при побудові динамічних моделей дозволяє встановити, що контактні сили між тяговим органом та роликоопорами при рівномірному прискоренні можуть суттєво коливатися, створюючи значні знакозмінні навантаження, які призводять до передчасного втомного руйнування елементів [56].

У роботі [57] для прогнозування поведінки системи при транспортуванні зернових матеріалів кажуть, що доцільно використовувати методику спряженого моделювання FEM та DEM. Такий підхід дає змогу врахувати складну взаємодію між в'язкопружною стрічкою та дискретним середовищем насипного вантажу, забезпечуючи високу точність прогнозування прогину стрічки та розподілу тиску в зоні роликоопор [57]. Дослідження в яких використовується скінченно-елементний аналіз підтверджують, що використання пластикових роликів у трироликових опорах у поєднанні зі зменшенням зазору між ними є більш ефективною конфігурацією в порівнянні зі сталевими аналогами, особливо за умови прагматичних навантажень, характерних для зернових елеваторів [58].

У статті [59], для розрахунку потужності двигуна, опір провисанню виступає ключовим параметром. В цій статті встановлено, що нормальна сила взаємодії між стрічкою та роликовою групою в таких системах є лінійною

комбінацією сил формування стрічки та гравітаційних складових, де коефіцієнти переважно визначаються ступенем наповнення [59]. У [60] наведені експериментальні дослідження тиску в роликових групах трубчастих конвеєрів із використанням гексагональних вимірювальних пристроїв, які демонструють високу збіжність (похибка становить близько 7,3%) із теоретичними моделями, що базуються на модальному аналізі.

Вивчення кінематичних параметрів та механізмів взаємодії потоку матеріалу з конструктивними елементами жолобів за допомогою технології дискретного моделювання дозволяє встановити, що кут падіння, що перевищує понад 65° провокує створення концентрованого потокового режиму, який створює піковий локальний тиск, що перевищує 3,2 МПа [61]. Також в цій статті [61] автори встановили, що оптимізація геометрії пересипного пристрою шляхом впровадження дугоподібних дефлекторів зі змінною кривизною забезпечує розсіювання енергії зіткнення майже вдвоє, одночасно знижуючи середню швидкість потоку на 38%.

Оцінка ударної міцності гумотканинних стрічок, які являються найдорожчим компонентом системи, що працює у складних експлуатаційних умовах, вимагає застосування сучасних методів прогнозування та інтелектуальних методів аналізу на основі машинного навчання, зокрема штучних нейронних мереж [62]. Дослідження перехідних режимів та досліджуючи фізичну природу взаємодії вантажу зі стрічкою, науковці [63, 64] висунули гіпотезу про подібність цього процесу до затухаючих гармонійних коливань, де коефіцієнт демпфування виступає критичним показником для визначення ступеня пошкодження оболонки і каркаса. Тобто розрахований коефіцієнт демпфування [63, 64] стає ключовим індикатором для визначення ступеня пошкодження верхнього шару та каркаса стрічки, дозволяючи встановити граничні стани руйнування.

У роботах [65, 66] зазначається, що використання методів регресійного аналізу та планування експерименту (DOE) дозволяє ідентифікувати локальні

пікові сили, встановлюючи математичну залежність між висотою падіння, масою матеріалу та реакцією підтримуючої системи роликоопор.

У [67] автори зазначають, що моделювання профілю напружень на завантаженій стрічці за допомогою методу розриву напружень, який базується на аналізі внутрішнього тертя в масиві сипкого матеріалу (зерна) є важливим для проектування. Запропонована гіпотеза динамічного переміщення вантажу враховує внутрішнє тертя та поведінку на межі розподілу «матеріал – стрічка», дозволяючи повною мірою охарактеризувати активний та пасивний стани напруження [67].

Аналогічно до вивчення когерентності атмосферних потоків за Лагранжем, що дозволяє виявляти стійкі повітряні потоки [68], аналіз траєкторій окремих зерен у зонах низької дисперсії допомагає оптимізувати наповнення стрічки та стабілізувати її рух.

Автори [69] у роботі встановили, що при транспортуванні вантажу на криволінійних (поворотних) ділянках лінії траси, де виникають нелінійні коливання, розподіл зусиль є нерівномірним і максимальні напруження припадають на центральну частину стрічки, причому навантаження на зовнішню сторону стрічки зростає пропорційно квадрату швидкості, тоді як на внутрішній – зменшується. Також автори [69] дослідили, що динамічне моделювання методом дискретних елементів (DEM) підтверджує, що кут нахилу роликоопор є вирішальним фактором стабілізації стрічки при проходженні криволінійних ділянок лінії.

При моніторингу стану тягового органу, також увагу приділяють вимірюванню локальних пікових ударних сил за допомогою методу планування експерименту (DOE) [66]. Математичні моделі виявляють пряму залежність між першим піком сили та параметрами падіння, тоді як наступні піки визначаються демпфуючими властивостями системи «стрічка – підтримуючі ролики» [70, 66]. Також якість гумотканинних виробів, вчасності стрічок в умовах динамічного навантаження оцінюється через логістичну регресію, що враховує умови зберігання та фізико-механічні властивості транспортованого вантажу [70].

При дослідженні та аналізі траєкторій руху частинок у багатофізичних полях, де на кінематичні параметри суттєво впливає не лише швидкість стрічки, а й магнітна проникність та розмір включень [71]. Незважаючи на специфіку магнітної сепарації, отримані дані в статті [71], про динамічну поведінку потоку можуть бути адаптовані для вдосконалення систем очищення зернових матеріалів на конвеєрних лініях. Таким чином, інтеграція результатів моделювання ударних процесів, аналізу напружено-деформованого стану та методів інтелектуального прогнозування створює наукове підґрунтя для оптимізації законів керування електромеханічними системами конвеєрів, гарантуючи стійкість руху та подовження терміну експлуатації стрічки.

Враховуючи конструкторську складову, приводний двигун із редуктором зазвичай монтуються на структурних конструктивних елементах рами, гнучкість цих елементів за певних умов провокує виникнення вібраційних проблем, таких, як ефект «м'якої лапи» або деформація опорної плити, зазначається у статті [72]. Також автори [72] встановили, що застосування модального аналізу дозволяє виявити пускові частоти збурення, які збігаються з власними частотами конструкції, викликаючи різке зростання амплітуди коливань, що усувається шляхом локального підвищення жорсткості рами в пучностях форм коливань. Автори [73] провели частотне моделювання вимушених коливань, яке виконане на основі гармонійної функції ексцентричної маси привода, яке унаочнює механізм впливу частоти збурення на амплітудний відгук опорних вузлів. Проведене експериментальне розгонування із застосуванням швидкого перетворення Фур'є (FFT) у частотній області, дає об'єктивні дані для побудови систем безперервного моніторингу динамічної чутливості рами [73].

Також аналіз перехідних режимів роботи (руху) ускладнюється трибологічними факторами, так як, явище сухого тертя між дотичними елементами транспортної машини вносить суттєві розриви неперервності в математичні моделі. Розглядаючи поведінку динамічної системи, що описується нелінійним диференціальним рівнянням, розробники часто стикаються з виникненням автоколивань та ефектом біфуркації, зумовленими різницею між

коефіцієнтами статичного та динамічного тертя [74]. Результати експериментальних тестів в роботі [74] на спеціалізованих стендах із дисками, що обертаються, доводять, що стандартне програмне забезпечення для автоматизованого проектування (CAD) і динамічного аналізу іноді помилково прогнозує затухаючий характер коливань замість підтримуваних стійких осциляцій, вимагаючи впровадження більш складних нелінійних моделей тертя.

Значний з практичної точки зору, інтерес, для сучасних елеваторних комплексів являють інноваційні рейково-стрічкові конвеєрні системи. В них стрічка спирається на ходові візки, які переміщуються по напрямних [75]. Моделювання динаміки приводу таких систем методом багатомасових динамічних систем (MBD) у середовищі MSC.ADAMS дозволяє детально проаналізувати значні переміщення ланок і зафіксувати ударно-контактні зусилля в момент пуску [75]. Також у статті [75] зазначається, що траєкторії руху елементів, зафіксовані за допомогою високошвидкісних камер, підтверджують адекватність побудованих MBD-моделей із середньою похибкою не більше 3,95% порівняно з фізичним експериментом. А при русі ходових візків на криволінійних (не прямих) ділянках малого радіуса виникає складна нелінійна залежність між бічним натягом стрічки та радіусом кривої, що негативно впливає на стійкість руху [76]. За результатами чисельних симуляцій, врахування відцентрових сил та взаємодії коліс із рейками дозволило встановити, що оптимізація кута підняття внутрішньої рейки до значення $8,5^\circ$ ефективно мінімізує бічні сили взаємодії і стабілізує систему на поворотах [76].

Для рейкових конвеєрів проблема ударних та вібраційних навантажень є не менш важливою в поворотних механізмах (turnover system), де різка зміна напрямку руху візків викликає інтенсивні віброакустичні коливання. Дослідження коливальних характеристик рейок за допомогою принципу д'Аламбера та програмного комплексу RecurDyn показало, що збільшення швидкості руху візків та зменшення їхньої колісної бази призводять, до різкого зростання вібраційного прискорення в моменти входу та виходу з поворотного вузла [77]. Статичний аналіз у COMSOL виявив, що найбільш напруженими

зонами, які є основними джерелами шуму та потенційної втоми металу, виступають рейкові стики та місця з'єднання колій із підтримуючими кронштейнами [78]. У роботі [79] зазначається, що комплексний інженерний аналіз динамічної поведінки обладнання має значення не лише для підвищення надійності машин, а й для забезпечення нормативних умов праці обслуговуючого персоналу елеваторних ліній, оскільки інтенсивна низькочастотна вібрація конвеєрного транспорту здатна здійснювати шкідливий вплив на внутрішні органи людини.

Аналізуючи наукові праці дослідників вимальовується картина, що забезпечення експлуатаційної надійності конвеєрних систем, що транспортують зернові матеріали, безпосередньо залежить від мінімізації динамічних навантажень у перехідних режимах (пуску та гальмування), серед яких стадія пуску є найбільш критичною. Робота приводних електродвигунів через з'єднувальні елементи та редукторні механізми, супроводжується передачею крутного моменту на опорні металоконструкції, гнучкість яких нерідко зумовлює виникнення небажаних коливань і резонансу. Застосування пристроїв плавного пуску (soft starters) дозволяє знизити пікові натяги стрічки та оптимізувати енергетичні характеристики електромеханічної системи зазначається у роботі авторів [80]. На основі поєднання диференціальних рівнянь руху механічної частини (привода) та математичного опису асинхронного двигуна, визначено параметри налаштування софт-стартера, зокрема тривалість наростання напруги і частоти, а також її початковий рівень, що дозволяють суттєво зменшити середньоквадратичні втрати енергії в обмотках [80].

Для конвеєрів із проміжними приводами, де навантаження вздовж тягового контуру розподіляється нерівномірно через флуктуації зернового потоку, традиційні лінійні закони розгону виявляються неефективними. Використовуючи методи безперервної динаміки в середовищі MATLAB, вдалося проаналізувати зміну натягу стрічки за умов нерівномірного розподілу маси вантажу та запропонувати нову комбіновану параболічну криву прискорення [81]. У роботі [82] розглядаються довгомірні високошвидкісні лінії в, яких

знаходить застосування лінійний електропривод, що має надзвичайно м'які механічні характеристики та дозволяє знизити загальний рівень натягу за рахунок раціонального розподілу тягового зусилля вздовж лінії транспортування. Результати експериментів на замкнутих стендах підтверджують, що тягове зусилля лінійного двигуна пропорційне квадрату напруги та квадрату оберненої величини повітряного зазору, рівномірність якого під час пуску є вирішальним фактором для усунення динамічних похибок [82].

У роботі [83] розглядаються не тільки електричні методи регулювання, для керування гальмуванням та стабілізацією швидкості стрічки в перехідних режимах (пуск/гальмування), а й застосування дискових гідравлічних систем. Моделювання такої електрогідродинамічної координованої системи за допомогою жорстко-гнучких зв'язаних моделей в ADAMS та AMESim дозволило виявити, що температурні або конструктивні деформації гальмівного диска викликають осьові коливання та гідроудари [83], а впровадження безмодельного адаптивного алгоритму в класичний PID-регулятор, налаштований за допомогою нечіткої логіки в Simulink, забезпечує значно швидший та стабільніший відгук системи, мінімізуючи амплітуду осьових осциляцій диска [83]. В статті [84] зазначається, що складні динамічні процеси притаманні також і гідроприводам із паралельно включеними гідромоторами, де перехідні режими регулюються запірно-регулювальними елементами залежно від корисного моменту опору на приводному барабані. Для демпфування вібрацій при розмиканні фрикційної муфти та запобігання утворенню вакуумних порожнин, інженерна практика вимагає встановлення зворотних та запобіжно-переливних клапанів, параметри яких визначаються масою плунжера та коефіцієнтом демпфування [84].

Для безпечного обслуговування конвеєрного транспорту також, необхідно враховувати потенційно пружно-дисипативні енергії, що акумулюється в тяговому контурі стрічки при виникненні аварійних ситуацій, наприклад, при заклинюванні роликів через просипання зерна [85]. Динамічне моделювання методом зосереджених мас показує, що раптове вивільнення накопиченої еластичної енергії після вимкнення живлення створює загрозу травмування

персоналу, що вимагає розробки спеціальних блокувальних пристроїв [85]. На відкритих майданчиках елеваторних комплексів на стійкість руху та напружений стан стрічки додатково впливають аеродинамічні навантаження під час екстремальних вітрових явищ [86]. При експлуатації конвеєрів у закритих приміщеннях необхідно оцінювати ризики виникнення пожеж, для чого за допомогою методів TG-FTIR проводять термічний аналіз піролізу матеріалу стрічки, визначаючи кінетичні параметри та виділення горючих газів (CH_4 , CO , CO_2) на різних стадіях термічної деструкції, що є важливим для побудови систем раннього сповіщення [87].

Дослідження динамічних параметрів стрічкових конвеєрів, в'язкопружних характеристик стрічок, а також процесів виникнення ударних і хвильових навантажень у тяговому контурі формують теоретичне підґрунтя для дослідження законів керування режимами пуску електромеханічного приводу. За рахунок інтеграції уточнених моделей розрахунку опору руху, аналізу напружено-деформованого стану стрічки та методів прогнозування перехідних процесів забезпечується можливість обмеження динамічних перевантажень, стабілізації натягу стрічки й підтримання стійкості руху конвеєра під час транспортування зернових матеріалів. Урахування нелінійних пружно-дисипативних властивостей тягового контуру та змінних інерційних характеристик вантажопотоку дозволяє мінімізувати ризик передчасного зносу стрічки, знизити енергетичні втрати у режимах пуску та підвищити експлуатаційну надійність конвеєрів, вчасності стрічкових в умовах тривалого циклічного навантаження.

1.3. Оптимізаційні дослідження стрічкових конвеєрів

З проведеного аналізу динамічних досліджень (пункт 1.2), встановлено, що ефективне функціонування сучасних виробничих потужностей, машинобудування та агропромисловий комплекс значною мірою залежить від надійності засобів безперервного транспорту, де стрічкові конвеєри зазнають нерівномірного завантаження через приводні механізми та природні коливання інтенсивності зернового потоку. З метою мінімізації споживання електроенергії

та реалізації концепції екологічного виробництва, доцільно впроваджувати алгоритми автоматичного регулювання швидкості тягового органу відповідно до поточного наповнення [88]. Запропонований у статті [88], трикроковий метод ідентифікації транзитних станів, що базується на оцінці, розрахунку та оптимізації, дозволяє знайти мінімальний час коригування швидкості з урахуванням ризиків проковзування, забезпечуючи зниження річних витрат електричної енергії понад 10% для похилих конвеєрів. Для вирішення аналогічних завдань у складних складальних лініях із динамічним змішуванням продукції побудовано замкнену модель на основі класичного PID-контролера в середовищі Simulink, яка демонструє високу робастність до невизначеностей у часових інтервалах та коливань швидкості [89].

У роботі [90] вказується, що під час інтеграції мікроконтролерних засобів автоматизації у конвеєрні комплекси виникає потреба в побудові точних контурів зворотного зв'язку для відпрацювання заданих діаграм розгону. Шляхом застосування апаратної платформи на базі мікроконтролера STM32F407VET6 та цифрових енкодерів Холла реалізовано високоточну замкнену систему частотного керування, яка за допомогою широтно-імпульсної модуляції нівелює похибки від зміни статичного моменту опору зернового насипу [90]. Експериментально доведено, що впровадження PID-алгоритму зменшує пускове відхилення швидкості з 13% до нормативного інженерного діапазону, забезпечуючи час перехідного процесу на рівні 0,83 секунди без виникнення коливальних процесів у механічних передачах [90].

У системах із пересувними конвеєрними модулями, які працюють на неструктурованих майданчиках, натяг стрічки зазнає додаткових збурень від коливань опорної поверхні. Для компенсації багатопараметричних невизначеностей та динамічних навантажень розроблено метод адаптивного ковзного режиму з несингулярною термінальною функцією, який гарантує збіжність помилки відстеження у скінченний час та усуває ефект автоколивань привода [91]. Також у роботі [91] зазначається, що формування спеціальної функції бажаної швидкості за цим алгоритмом дозволяє досягти плавного

безривкового прискорення, це є основною умовою для збереження стабільності положення зернового матеріалу на стрічці. Особливу точність позиціонування (до 98%) продемонстрували також пускові алгоритми розвантажувальних візків конвеєрів, де динамічна модель об'єкта будується на основі нейронних мереж радіально-базисних функцій, що мінімізують запізнення в кінематичних парах [92].

Перспективним інженерним рішенням для конвеєрів є перехід від традиційних приводів до інтелектуальних систем на основі синхронних двигунів на постійних магнітах із прямим з'єднанням з приводним барабаном. Впровадження векторного керування з подвійним замкненим контуром та інтелектуальних натяжних станцій забезпечує м'який (плавний) пуск важконавантаженої системи стрічкового конвеєра, вирівнювання крутних моментів між кількома двигунами та миттєве зменшення проковзування стрічки при раптових завалах [93]. В статті [94], для реалізації систем керування такими багатомоторними комплексами розроблено оптимізований нейромережевий контролер, що функціонує на базі редукованої моделі, сформованої методом належного ортогонального розкладання для зниження порядку динамічних рівнянь без втрати точності розрахунку натягу.

У роботі [95] розглядається математичне моделювання перехідних процесів у частотно-регульованих асинхронних приводах конвеєрів при номінальному завантаженні, яке успішно виконується в MATLAB/Simulink із застосуванням кореневого методу та діаграм Вишнеградського. Розрахункові параметри налаштування контуру швидкості забезпечують мінімальне перерегулювання електромагнітного моменту, що підтверджено низьким відхиленням вихідних характеристик (в межах 0,014%) під час моделювання пуску під навантаженням [95]. Окрім того, математичний апарат диференціальних рівнянь у частинних похідних (PDE) дозволяє синтезувати алгоритми оптимального релейного керування швидкістю при нерівномірному розподілі щільності зерна вздовж лінії, мінімізуючи сумарні втрати енергії на переміщення матеріалу [96].

Сучасна концепція цифровізації у роботі [97], передбачає керування конвеєром на основі технології цифрових двійників (Digital Twin). Запропонований метод «рішення–симуляція–корекція» використовує динамічні моделі стрічки за другим законом Ньютона зі змінною масою та скінченно-елементний аналіз для побудови оптимальної кривої швидкості в режимі реального часу, підвищуючи коефіцієнт наповнення стрічки та забезпечуючи енергозбереження на рівні 13,87% [97]. У поєднанні з дворівневою структурою оптимізації на основі генетичних алгоритмів та інструментів Big Data, такі системи дозволяють адаптувати швидкість розгону та усталеного руху до флуктуацій вхідного потоку зерна, досягаючи максимального коефіцієнта енергозбереження до 0,533 при продуктивності ліній близько 3000 т/год [98].

Під час пуску стрічкових конвеєрів, які задіяні у переміщенні сипких сільськогосподарських вантажів, у тяговому контурі виникають нестационарні коливальні явища, здатні викликати значні перевантаження механічних вузлів. Проблема передчасного виходу з ладу роликпопори та руйнування стрічки суттєво загострюється при транспортуванні сильно засмічених зернових культур, коли абразивний пил проникає в підшипникові вузли, збільшуючи пусковий момент опору та ініціюючи додаткові динамічні навантаження [99]. Модернізація конструктивних елементів на завантаженій гілці, орієнтована на стабілізацію поперечного профілю, дозволяє значно знизити просипання вантажу по обидва боки лінії трічки та мінімізувати ризики проковзування стрічки на приводному барабані [99]. Для точного визначення конструктивних параметрів системи, зокрема необхідної ширини стрічки, першорядне значення має розрахунок площі поперечного перерізу потоку матеріалу. Порівняльний аналіз чинних нормативних методик DIN 22101, ISO 5048 та СЕМА показує, що формули СЕМА мають надмірний запас міцності при значній ширині стрічки, погіршуючи економічні показники, тоді, як стандартизований підхід ISO 5048 пропонує просту і збалансовану геометричну форму, рекомендовану для проектування сучасних автоматизованих ліній, зазначається у роботі [100].

На почату пуску для забезпечення стійкості руху та виключення провисання стрічки важливим є вибір раціональної стратегії автоматичного регулювання натяжного пристрою. В статті [101] шляхом імітаційного моделювання в середовищі ADAMS було досліджено коливання натягу в головній частині протяжних одноприводних конвеєрів під впливом змінної швидкості, тривалості пуску та раптового накидання навантаження. Отримані результати у роботі [101] підтверджують, що впровадження динамічної системи автоматичного керування натяжним пристроєм дозволяє ефективно гасити пускові хвилі, підвищуючи загальну безпеку і знижуючи питоме споживання енергії електромеханічною системою. Чисельний аналіз плоских конвеєрних моделей показує, що геометричні параметри натяжної станції, зокрема радіус натяжного колеса та положення центра його обертання, безпосередньо формують динамічний відгук тягового органу, причому коригування просторового розташування центра обертання забезпечує плавніший перехідний режим [102].

У статті [103] зазначається, що специфічні умови експлуатації виникають у спеціалізованих транспортно-технологічних машинах аграрного сектора, де використовуються затискні стрічкові механізми, наприклад, для орієнтованого поштучного вивантаження цибулинних культур. Дослідження таких систем за допомогою спряженого моделювання методом дискретних елементів та динаміки багатокомпонентних гнучких тіл дозволило встановити складні регресійні залежності між кутом затискних стрічок, теоретичною швидкістю подачі та коефіцієнтом диференціала швидкостей, що оптимізує якість технологічного процесу [103]. У потужних конвеєрних сушарках ланцюгового типу нелінійні коливання та контактні імпульси виникають внаслідок прояву полігонального ефекту ланцюгового зачеплення, що викликає періодичні коливання швидкості та втомні руйнування опорних пластин. Тому застосування зв'язаного комплексу програм дозволяє розрахувати цикли втоми та модифікувати геометричні параметри пластин, завдяки чому еквівалентні

напруження знизилися нижче межі текучості матеріалу, подовжуючи тривалість експлуатації [104].

Дослідження [105] присвячене похилим конвеєрам зазначається, що при раптовій зупинці привода під навантаженням виникає загроза зворотного руху стрічки під дією сили тяжіння зернової маси, що вимагає встановлення надійних зворотних гальмівних присторів. Динамічна поведінка всієї системи під час блокування зворотного ходу, проаналізована за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення з урахуванням жорсткості та демпфування компонентів, вказує на виникнення значних пікових крутних моментів [105]. Пропонується також впровадження систем розподілу навантаження між гальмівними пристроями в багатомоторних приводах у поєднанні з сучасними фрикційними матеріалами дозволяє обмежити граничні навантаження в умовах обмеженого монтажного простору [105]. У роботі [106] кажуть, що для важких умов підземних та похилих конвеєрних ліній також використовуються гідрокеровані динамічні затискачі стрічки, гальмівне зусилля яких пропорційне тиску в гідросистемі. Також спільне застосування аналітичних інженерних розрахунків та методу скінченних елементів підтвердило, що при номінальних бічних навантаженнях сумарні напруження в зоні контакту балки зі стрічкою товщиною до 50 мм не перевищують допустимих меж, визначених стандартами для підіймально-транспортного обладнання [106].

Екологічним напрямком є впровадження трубчастих конвеєрів, у яких стрічка згортається в циліндр, повністю ізолюючи зерно від навколишнього середовища. Небезпечною зоною такої лінії є перехідна ділянка від плоского профілю до трубчастого, де деформаційні криві, розраховані методом мікроелементного формування, визначають контактну взаємодію з роликami [107]. Скінченно-елементний аналіз системи «стрічка – ролик» показав, що оптимізація перекриття країв стрічки та підйому барабана дозволяє суттєво зменшити динамічні контактні сили, мінімізуючи експлуатаційні витрати [107]. З метою підвищення загальної надійності та впровадження інтелектуальних функцій керування перехідними процесами дедалі частіше створюються

інформаційні моделі на основі технології цифрових двійників [108]. Використання послідовних екстремальних машин навчання у віртуальному просторі, що функціонують у поєднанні з покращеним алгоритмом оптимізації китів (IWOA), дозволяє в реальному часі прогнозувати та коригувати зусилля натяжних та очисних механізмів стрічкового конвеєра, забезпечуючи зниження енергоспоживання на 8,61% та запобігаючи просипанню дрібнодисперсної фракції, зазначається у праці [108]. Подібні проактивні інженерні методи обслуговування, засновані на активації стандартів проектування, дозволяють підвищити якість функціонування динамічних елементів роликів опор майже на 50%, гарантуючи довговічність і стійкість руху транспортного комплексу [109].

Забезпечення надійності електромеханічних систем конвеєрного транспорту, що переміщує багатотонні потоки зернових матеріалів, безпосередньо пов'язане з мінімізацією перехідних динамічних навантажень та своєчасною діагностикою критичних вузлів приводу. Раптові відмови приводних асинхронних двигунів або редукторних механізмів в умовах інтенсивної експлуатації призводять до значних фінансових збитків через тривалі простої та аварійні зупинки лінії. Шляхом побудови математичних моделей на основі динамічних графів та частотного аналізу струмів статора за допомогою швидкого перетворення Фур'є вдалося реалізувати ефективний алгоритм предиктивного моніторингу [110]. Застосування машин навчання, як класифікатора дозволяє з точністю до 95,92% розпізнавати експлуатаційні дефекти, такі, як обриви стрижнів ротора чи міжвиткові замикання, суттєво підвищуючи надійність та строк служби (роботоздатність) приводу конвеєра при варіативних навантаженнях зерновим потоком [110].

Для оцінки залишкового ресурсу підшипників роликів опор, які є найбільш масовими тримальними компонентами тягового органу, розроблено інтегровану методику на базі актуалізованого алгоритму AdaBoost та релевантних векторних машин [111]. В статті [112] з метою зниження обчислювальних витрат та усунення інформаційної надмірності при акустичній діагностиці роликів

ефективно використовується комбінація частотних коефіцієнтів Мела та стохастичного вкладення, де оптимізація параметрів класифікатора здійснюється за допомогою модифікованого алгоритму. Водночас, для усунення сильних шумових завад у підземних або закритих галереях елеваторів вібраційні сигнали редукторів піддають адаптивному розкладанню на варіаційні моди, після чого компоненти класифікуються методом опорних векторів найменших квадратів, оптимізованим алгоритмом рою часток (IPSO), що гарантує точність розпізнавання пошкоджень зубчастих передач на рівні 96,85% [113].

Також важливим аспектом підвищення безпеки перехідних режимів є автоматизація виявлення аварійних станів тягового контуру, зокрема поздовжніх пошкоджень та бічного сходження стрічки під впливом нерівномірного розподілу маси дрібнодисперсного насипу зерна. Впровадження систем машинного зору на базі архітектури YOLOv8-OBV у поєднанні з геометричним аналізом зображень та методом головних компонентів забезпечує високоточне (mAP до 99,7%) відстеження кутів зсуву країв стрічки в реальному часі навіть за умов нестабільного освітлення перевантажувальних станцій [114]. В статті [115] зазначається, що для роботи в умовах сильної запиленості та обмеженої видимості підземних бункерів розроблено алгоритми глобальної адаптивної HDR-фільтрації, де виділення лінійних ознак борту стрічки реалізується через оператори Кенні та перетворення Хафа за двобазисною схемою порівняння. Крім того, розпізнавання сторонніх предметів на стрічці, здатних викликати її розрив під час пуску, автоматизується за допомогою полегшених динамічних мереж SARC-DETR з механізмом адитивної уваги, які інтегруються в бортові обчислювальні модулі Jetson Xavier за допомогою процедур розрідженого прунінгу шарів пакетної нормалізації без суттєвої втрати аналітичної точності показується в статтях [116, 117].

У даній роботі [118] зазначається, що мультимодальне об'єднання RGB та інфрачервоних зображень за технологією YOLO-DKH, що використовує змієподібні механізми уваги (Dynamic Snake Attention), дозволяє мінімізувати завади від пилової хмари, успішно відокремлюючи контури великих фракцій

вантажу від фону. Для всебічного контролю геометричного стану та дефектів покриття стрічки розроблено комплексний фреймворк на основі Mask R-CNN, де модуль багатомасштабного динамічного злиття ознак (MS-DFF) та лапласівські конволюційні структури забезпечують чітку сегментацію меж пошкоджень [119]. Надійне управління ризиками незапланованих зупинок конвеєрних ліній досягається шляхом побудови динамічних баєсівських мереж, що функціонують на основі обробки великих масивів даних з датчиків [120]. У статті [121] наводиться припущення, яке дозволяє успішно прогнозувати сценарії аварійних ситуацій та формувати режими для систем автоматичного натягу та плавного пуску конвеєра [121].

У роботі [122] для діагностики підшипників роликотопор розроблено метод перетворення вібросигналів у інтегральні зображення (GADF, RP, CWT) з їх класифікацією полегшеною нейромережею MRST-MobileViT, що забезпечує точність розпізнавання дефектів в умовах сильного шуму аспіраційних систем. Водночас, контроль деформацій та розривів самої стрічки автоматизовано за допомогою модифікованої моделі YOLOv8 із модулями, яка успішно ігнорує завади складного зернового фону [123].

У роботі [124] наводиться, застосування інтегрованих методів багатокритеріального прийняття рішень, зокрема розмитого аналітичного ієрархічного процесу (Fuzzy AHP) та методів зваженої суми й добутку, що дозволяє провести комплексний порівняльний аналіз логістичних витрат. Також встановлено, що при відстані до кінцевого пункту в межах 50 км використання стрічкових конвеєрних систем є найбільш доцільним за критеріями питомої експлуатаційної вартості та початкових інвестицій, хоча чутливість системи до ринкових коливань вимагає гнучкого операційного планування [124].

Для детального розрахунку кінематичних та конструктивних параметрів конвеєрних ліній інженерами застосовуються спеціалізовані середовища симуляції. Проведений порівняльний аналіз програмних продуктів ExtendSim, Sidewinder та Tecnomatix Plant Simulation виявив суттєві переваги останнього за функціональною шириною та інструментами 3D-анімації [125]. Розроблена на

його базі динамічна модель дозволяє варіювати швидкість розгону та параметри пускового моменту з урахуванням фізико-механічних характеристик зернового насипу [125]. Додатково загальні принципи побудови таких моделей і розв'язання рівнянь руху механічної частини реалізуються у спеціалізованому софті для шахтних конвеєрів, що дозволяє проводити повний динамічний аналіз завантаженого контуру [126].

У дослідженні [127] встановлено, що оптимізація закону керування приводом довгомірних багатоконвеєрних систем базується на представленні установки, як комплексної динамічної розподіленої структури. Також у статті [127] зазначається, що математичне моделювання в рамках *instantaneous approximation* за допомогою диференціальних рівнянь у частинних похідних дає змогу розрахувати лінійну щільність зерна та матеріальний потік у будь-якій точці лінії для перехідних і сталих режимів роботи при заданій функції швидкості приводного барабана. Систематизація наукових підходів до вивчення пружно-дисипативних властивостей гнучких органів свідчить, що точність інженерних розрахунків залежить від коректного моделювання контакту між стрічкою та шківом, фрикційного зчеплення та явищ проковзування, які оцінюються за допомогою теорії зсуву, скінченно-елементного аналізу та багатомасових моделей [128].

У процесі безперервного руху вантажу по стрічці виникає потреба в точному моніторингу його маси. Порівняльний аналіз часових фільтрів для динамічних систем зважування конвеєрного типу показав, що інтеграція фільтра Калмана в комерційні цифрові процесори (наприклад, Teensy 4.0) дозволяє ефективно компенсувати похибки від коливань стрічки та гасити високочастотні коливання (шуми) з мінімальною помилкою, хоча за часом обчислення швидшим виявляється ІІР-фільтр [129]. Подібні динамічні випробування гнучких органів проводяться і для нестандартних ліній Man-Machine Cooperation, де за допомогою програмного комплексу ANSYS розраховуються втомні напруження та релаксаційні характеристики рослинної сировини з метою оптимізації швидкості стрічки зазначається в статті [130].

РОЗДІЛ 2

ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА

2.1. Динамічна модель стрічкового конвеєра

При побудові динамічної моделі стрічкового конвеєра враховується основний керований рух, який визначається приводним механізмом та некеровані рухи, які виникають через наявність пружних властивостей окремих ланок. При побудові динамічної моделі будемо вважати, що всі елементи стрічкового конвеєра є абсолютно твердими ланками, окрім елементів приводу, які мають пружні властивості. Тоді динамічна модель стрічкового конвеєра має два ступені свободи і представляється двомасовою моделлю. Обидві маси динамічної моделі стрічкового конвеєра зведемо до приводного барабану. Так як барабан здійснює обертальний рух, то і зведені маси також обертаються. Ці маси моделі з'єднані пружним елементом, жорсткість якого залежить від жорсткості елементів передавального механізму приводу. На першу масу динамічної моделі діє рушійний момент електродвигуна, зведений до осі повороту барабана, а на другу масу діє зведений до осі того ж барабана момент сил опору переміщенню стрічки з вантажем (зерновим матеріалом). Зведений момент сил опору залежить від ваги зернового матеріалу на стрічці та зведеного коефіцієнту опору між стрічкою та опорними роликами конвеєра.

До першої зведеної маси динамічної моделі входять елементи ротора електродвигуна та передавального механізму приводу, а до другої маси – приводний та натяжний барабани, стрічка та маса зерна, що знаходиться на стрічці. Для двомасової динамічної моделі стрічкового конвеєра треба визначити динамічні параметри: зведені моменти інерції першої та другої мас моделі; коефіцієнт жорсткості пружного елементу передавального механізму приводу; залежність рушійного моменту електродвигуна від частоти його обертання ротора, а також величину зведеного моменту сил опору переміщенню стрічки.

Для проведення динамічного аналізу стрічкового конвеєра двомасова динамічна модель дискретними обертальними масами наведена на рис. 2.1.

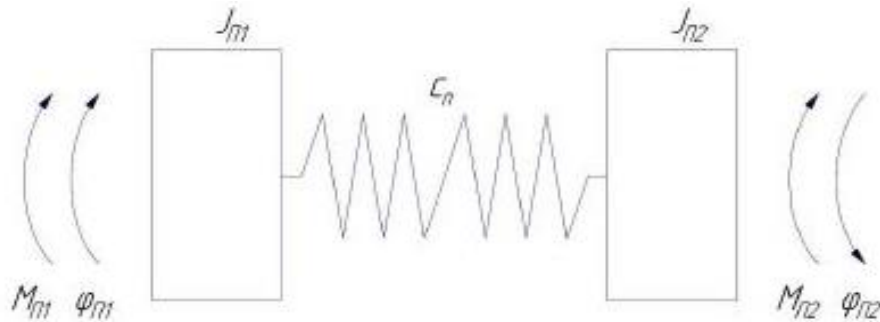


Рис. 2.1 – Двомасова динамічна модель стрічкового конвеєра

В динамічній моделі (рис. 2.1) використані такі позначення: $J_{п1}$, $J_{п2}$ – зведені моменти інерції першої та другої мас динамічної моделі; C_n – зведений до осі приводного барабана коефіцієнт жорсткості пружного елементу, що імітує елементи передавального механізму приводу; $M_{п1}$, $M_{п2}$ – зведений до осі приводного барабана рушійний момент приводного електродвигуна та зведений момент сил опору динамічної моделі стрічкового конвеєра; $\varphi_{п1}$ – кутова координата повороту першої зведеної маси динамічної моделі стрічкового конвеєра; $\varphi_{п2}$ – кутова координата повороту другої зведеної маси динамічної моделі стрічкового конвеєра.

Перша зведена маса динамічної моделі включає ротор електродвигуна та передавальний механізм приводу, а друга – приводний та натяжний барабани, стрічку з вантажем (зерновим матеріалом). Для визначення зведеного моменту інерції першої маси стрічкового конвеєра $J_{п1}$ прирівнюємо кінетичну енергію першої частини реального приводного механізму стрічкового конвеєра T_1 до кінетичної енергії першої зведеної маси динамічної моделі $T_{екв}$, в результаті чого будемо мати:

$$T_I = T_{екв}. \quad (2.1)$$

При визначенні параметрів динамічної моделі використані такі значення конструктивних параметрів стрічкового конвеєра:

$D_1 = 0.591$ м – діаметр приводного барабана;

$m_1 = 8.5 \text{ кг}$ – маса приводного барабана;

$D_2 = 0.591 \text{ м}$ – діаметр натяжного барабана;

$m_2 = 8.5 \text{ кг}$ – маса натяжного барабана;

$u = 3,3$ – передаточне число приводного механізму.

Для знаходження моментів інерції $J_{п1}$ та $J_{п2}$ зведених мас динамічної моделі визначимо моменти інерції окремих ланок стрічкового конвеєра.

Визначимо момент інерції приводного барабана J_1 , який визначається за формулою:

$$J_1 = \frac{1}{2} \frac{m_1 \cdot D_1^2}{4} = \frac{8.5 \cdot 0.591^2}{8} = 0.44 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Знайдемо також момент інерції натяжного барабана J_2 , який визначається за формулою:

$$J_2 = \frac{1}{2} \frac{m_2 \cdot D_2^2}{4} = \frac{8.5 \cdot 0.591^2}{8} = 0.44 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Знайдемо зведений момент інерції транспортуємого вантажу:

$$J_3 = m_3 \cdot \frac{D_2^2}{4} = 28 \frac{0.591^2}{4} = 2.44 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Зведені моменти інерції J_4 та J_5 , визначаються за формулою:

$$J_4 = J_5 = m_4 \cdot \frac{D_4^2}{4} = 8.5 \frac{0.46^2}{4} = 0.44 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

Де $D_4 = D_5 = 0.46 \text{ м}$ – діаметри барабанів конвеєра;

$m_4 = m_5 = 8.5$ – маси барабанів.

Зведений момент інерції робочої частини стрічкового конвеєра J_6 :

$$J_6 = (m_b + m_c) \frac{D_4^2}{4} = (110 + 239.2) \frac{0.46^2}{4} = 18.47 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

де $m_b = 110 \text{ кг}$ – маса зернового матеріалу, що транспортується стрічковим конвеєром;

$$m_c = 2 \cdot l_k \cdot \rho = 2 \cdot 20 \cdot 5.98 = 239.2 \text{ кг}.$$

Знайдемо величину зведеного до осі приводного барабану моменту інерції ротора електродвигуна та передавального механізму приводу $J_{п1}$ за такою формулою:

$$J_{п1} = (J_0 + J_1 + J_2) U^2 = (0.25 + 0.002 + 0.152) \cdot 3.3^2 = 4.6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

де $U = 3.3$ – передаточне число приводного механізму.

Визначимо зведений до осі приводного барабану, момент інерції стрічки з вантажем $J_{п2}$ за наступною залежністю:

$$J_{п2} = (J_4 + J_5 + J_6)U^2 = (0.44 + 0.44 + 18.47) \cdot 3.3^2 = 19,35 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Рушійний момент на валу приводного електродвигуна, зведений до осі приводного барабана, визначається за формулою Клосса:

$$M_{\partial в.} = \frac{2M_{\max} \cdot U \cdot \eta}{\frac{S}{S_{кр.}} + \frac{S_{кр.}}{S}}, \quad (2.2)$$

де S , $S_{кр.}$ – поточне та критичне ковзання електродвигуна.

Максимальний момент на валу електродвигуна визначається так

$$M_{\max} = \lambda \cdot M_H = 2.8 \cdot 273 = 764.4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Поточне значення ковзання електродвигуна визначається так:

$$S = 1 - \frac{g_1 \cdot U}{\omega_n}. \quad (2.3)$$

Критичне значення ковзання електродвигуна визначається за формулою:

$$S_{кр} = S_{ном} \cdot (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}), \quad (2.4)$$

де $\lambda = 2.8$ – кратність максимального моменту електродвигуна.

Номінальне значення ковзання визначається за наступною залежністю:

$$S_H = 1 - \frac{\omega_H}{\omega_0} = 1 - \frac{146,5}{157} = 0.06. \quad (2.5)$$

Після підстановки числових значень в залежність (2.4), знайдемо критичне ковзання електродвигуна:

$$S_{кр} = 0.06 \left(2.8 + \sqrt{2.8^2 - 1} \right) = 0.32.$$

Зведений момент сил опору переміщенню стрічкового конвеєра визначається за формулою

$$M_{п2} = \frac{(F_{н6} - F_{з6})D^4}{2} = \frac{2202.5 \cdot 0.46^2}{2} = 506.6 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.6)$$

Коефіцієнт жорсткості пружного елементу передавального механізму визначається за формулою

$$C = \frac{M_H}{\Delta\varphi}. \quad (2.7)$$

Після підстановки отриманих числових значень знаходимо допустиму деформацію пружного елементу приводу:

$$\Delta\varphi = 1^\circ;$$

$$\Delta\varphi = \frac{3.14 \cdot 1}{180} = 0.017 \text{ рад},$$

де $\Delta\varphi$ – допустима деформація пружного елементу приводу

Після підстановки числових значень в залежність (2.7) , знаходимо коефіцієнт жорсткості

$$C_{\pi} = \frac{273}{0,017} = 16060.8 \frac{\text{Н}\cdot\text{м}}{\text{рад}},$$

де C_{π} – коефіцієнт жорсткості пружного елементу приводу стрічкового конвеєра.

2.2. Математична модель стрічкового конвеєра

Математична модель стрічкового конвеєра представляє собою систему диференціальних рівнянь, яку побудовано на базі побудованої динамічної моделі. Динамічна модель відображає динамічні процеси роботи стрічкового конвеєра, тому на її основі складено математичну модель. Для цього використаємо принцип динамічної рівноваги , згідно з яким механічна система стрічкового конвеєра представляється у вигляді її моделі, що перебуває в стані динамічної рівноваги. У використаному принципі Даламбера розглядається динамічна рівновага кожної з мас динамічної моделі з прикладеними до них усіма силами. Тому розчленуємо зведені маси динамічної моделі стрічкового конвеєра на дві окремі маси з дією на них усіх сил (рис.2.2).

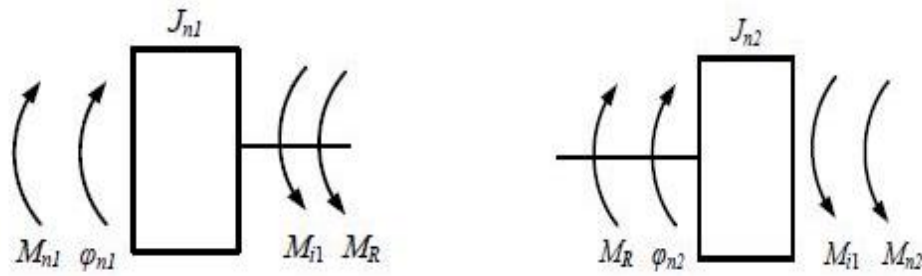


Рис. 2.2 – Розчленовані зведені маси динамічної моделі стрічкового конвеєра

У відповідності з принципом динамічної рівноваги кожної зі зведених мас стрічеового конвеєра з діючими зведеними силами отримаємо систему двох диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned} J_{n1}\ddot{\varphi}_1 &= M_{n1} - c(\varphi_1 - \varphi_2); \\ J_{n2}\ddot{\varphi}_2 &= c(\varphi_1 - \varphi_2) - M_{n2}, \end{aligned} \quad (2.8)$$

де J_{n1}, J_{n2} – моменти інерції першої та другої зведених мас динамічної моделі стрічкового конвеєра; M_{n1}, M_{n2} – зведені моменти рушійних сил приводу та сил опору переміщенню стрічки динамічної моделі стрічкового конвеєра; c – зведений коефіцієнт жорсткості пружних елементів приводу; φ_1, φ_2 – узагальнені координати першої та другої зведених мас динамічної моделі стрічкового конвеєра.

Система рівнянь (2.8) є системою двох нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку, яка описує динамічні процеси руху стрічкового конвеєра. Нелінійність системи диференціальних рівнянь пов'язана з нелінійною рушійного моменту приводу, яку показано на рис. 2.3.

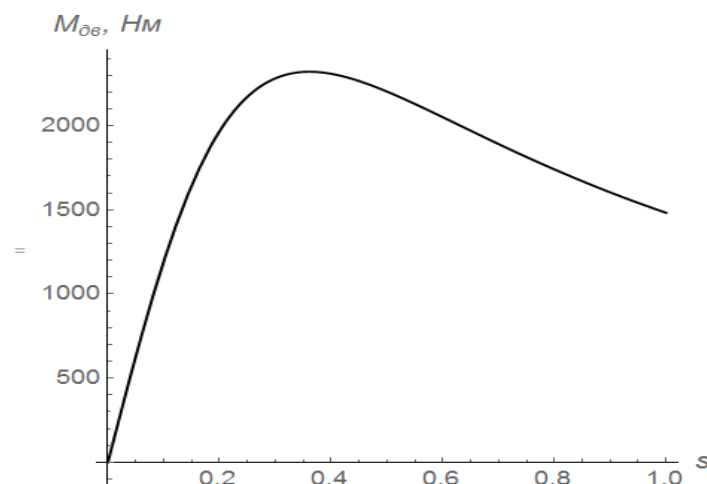


Рис. 2.3 – Механічна характеристика приводу стрічкового конвеєра

Оскільки механічна характеристика приводу стрічкового конвеєра є нелінійною, то систему диференціальних рівнянь (2.8) не вдається розв'язати аналітично, тому використані чисельні методи для її розрахунку.

2.3. Результати динамічний аналіз стрічкового конвеєра

В магістерській роботі проведені достатні розрахунки стрічкового конвеєра, які дали можливість розробити елементи конструкції, тягового органу та приводу. Для такого стрічкового конвеєра обрані параметри та характеристики, які необхідні для виконання динамічного аналізу при транспортуванні картоплі.

Після чисельного інтегрування системи диференціальних рівнянь руху стрічкового конвеєра (2.8) за допомогою комп'ютерної програми при розрахованих числових параметрах розробленого стрічкового конвеєра визначені кінематичні, силові та енергетичні характеристики конвеєра.

В результаті проведених розрахунків отримані графічні залежності кінематичних (рис.2.4, рис.2.5), силових (рис.2.6) характеристик приводу та тягового органу стрічкового конвеєра.

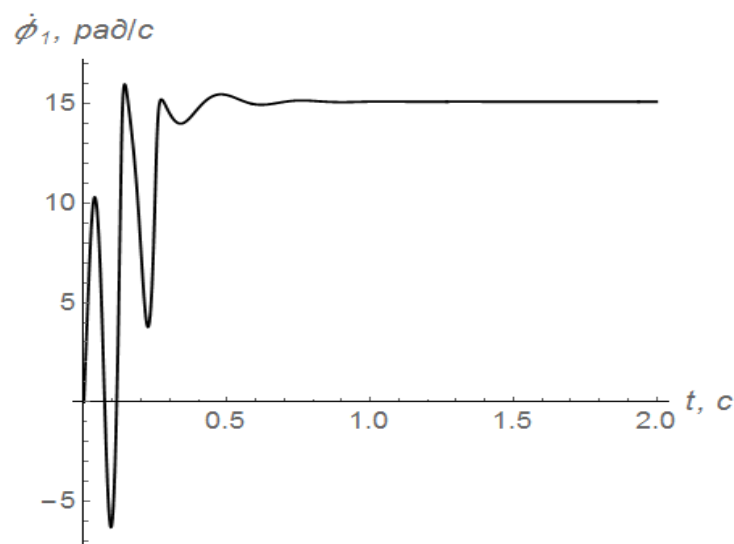


Рис. 2.4 – Графік швидкості першої маси динамічної моделі стрічкового конвеєра

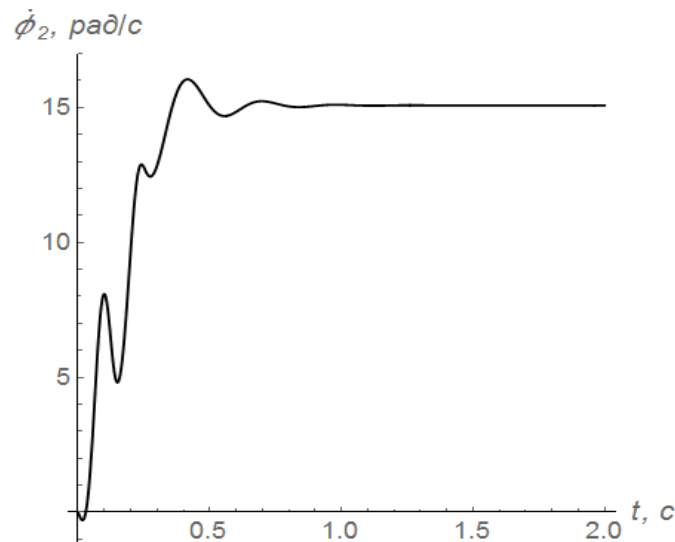


Рис. 2.5 – Графік швидкості другої зведеної маси динамічної моделі стрічкового конвеєр

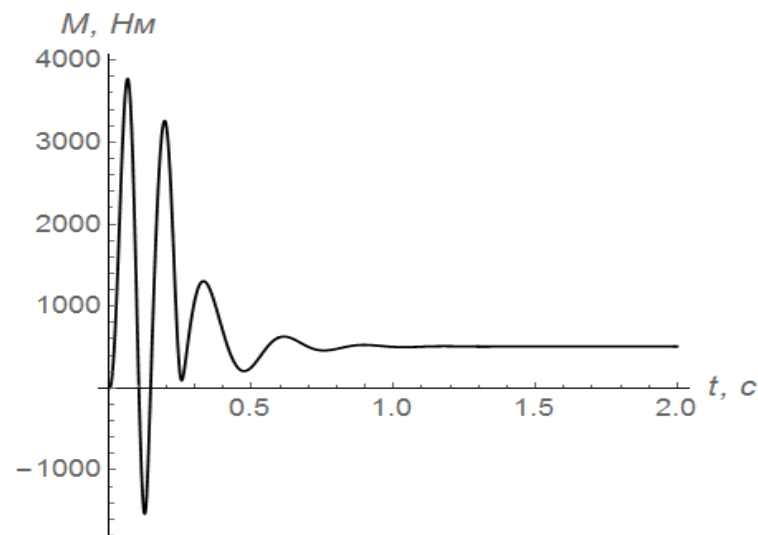


Рис. 2.6 – Графік зміни пружного моменту приводу стрічкового конвеєра

Аналіз побудованих графіків кінематичних та силових характеристик стрічкового конвеєра показує, що при зміні розглянутих характеристик мають місце коливальні процеси під час пуску. Тут максимальне значення пружного моменту у 7,8 разів перевищує усталене значення (рис. 2.6). Таке перевищення максимальних значень над усталеними вказує на динамічні перевантаження в процесі пуску стрічкового конвеєра.

Для зменшення динамічних навантажень в процесі пуску є потреба в проведенні оптимізації режиму пуску.

РОЗДІЛ 3

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ ПУСКУ СТІЧКОВОГО КОНВЕЄРА

3.1. Вибір критерію оптимізації режиму пуску стрічкового конвеєра

Динамічний аналіз режиму руху стрічкового конвеєра показав, що в приводі та стрічці виникають коливання кінематичних, силових та енергетичних характеристик. Амплітуда цих коливань є значною. При цьому максимальні значення усіх характеристик в декілька разів перевищують усталені значення. Тому є потреба в значному зменшенні динамічних та енергетичних навантажень в приводі та тяговому органі стрічкового конвеєра. Навантаження приводять до руйнування елементів приводу та тягового органу стрічкового конвеєра при транспортуванні зернових матеріалів.

Зменшити динамічні навантаження в елементах стрічкового конвеєра можна вибором режиму пуску приводу. Для цього запропоновано оптимізувати режим руху приводу на ділянці пуску, де виникають найбільші навантаження та коливання ланок. Ддинамічні навантаження приводять до втомного руйнування елементів приводу та тягового органу стрічкового конвеєра.

Для оптимізації режиму пуску приводу стрічкового конвеєра треба визначитись з критерієм оптимізації, який повинен відображати динамічні навантаження. Навантаження в критерії повинні відображатись протягом всього процесу пуску стрічкового конвеєра. Критерієм оптимізації режиму пуску стрічкового конвеєра оберемо пружний момент в передавальному механізмі приводу під час пуску.

За критерій оптимізації режиму пуску стрічкового конвеєра оберемо середньоквадратичне значення пружного моменту в приводі стрічкового конвеєра протягом процесу пуску, який представляється наступною залежністю

$$M_{pc} = \left(\frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} M_p^2 dt \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3.1)$$

де t, t_1 – координата часу та тривалість у пуску стрічкового конвеєра; M_p – момент сили в пружному елементі передавального механізму приводу. Критерій оцінює динамічні навантаження, які є небажаними для стрічкового конвеєра, тому при оптимізації режиму пуску його необхідно мінімізувати.

3.2. Оптимізація режиму пуску стрічкового конвеєра

Для оптимізації режиму пуску стрічкового конвеєра сформуємо критерій оптимізації. У вираз цього критерію повинен входити момент сили в пружному елементі приводу, який виражається наступною залежністю

$$M_p = c(\varphi_1 - \varphi_2), \quad (3.2)$$

де c – коефіцієнт жорсткості пружного елемента приводу стрічкового конвеєра; φ_1, φ_2 – кутові координати першої та другої зведених мас динамічної моделі стрічкового конвеєра.

З другого рівняння системи рівнянь (2.8) отримуємо момент в пружному елементі

$$M_p = c(\varphi_1 - \varphi_2) = J_{p2}\ddot{\varphi}_2 + M_{p2}, \quad (3.3)$$

де J_{p2} – момент інерції другої зведеної маси динамічної моделі стрічкового конвеєра; M_{p2} – зведений момент сил опору при переміщенні стрічки з зерном

Виразимо підінтегральний вираз критерію (5.1) з урахуванням залежності (3.3)

$$f = (J_{p2}\ddot{\varphi}_2 + M_{p2})^2. \quad (3.4)$$

Умовою мінімуму критерію (3.1) з урахуванням виразу (3.4) є рівняння Ейлера–Пуассона.

В результаті підстановки в рівняння Пуассона виразу (3.4) отримаємо умову мінімуму критерію (3.1)

$$\ddot{\varphi}_2 = 0. \quad (3.5)$$

Після інтегрування рівняння (3.5) отримаємо залежності координати другої зведеної маси динамічної моделі та її похідні за часом:

$$\begin{aligned}
\ddot{\varphi}_2 &= C_1; \\
\dot{\varphi}_2 &= C_1 t + C_2; \\
\dot{\varphi}_2 &= \frac{C_1 t^2}{2} + C_2 t + C_3; \\
\varphi_2 &= \frac{C_1 t^3}{6} + \frac{C_2 t^2}{2} + C_3 t + C_4.
\end{aligned} \tag{3.6}$$

Тут C_1, C_2, C_3, C_4 – постійні, що знаходяться з крайових умов руху стрічкового конвеєра:

$$t=0: \varphi_2 = 0; \dot{\varphi}_2 = 0; \quad t = t_1: \varphi_2 = \omega; \ddot{\varphi}_2 = 0. \tag{3.7}$$

В (3.7) ω – усталена кутова швидкість приводного барабана стрічкового конвеєра.

З крайових умов (5.7) для виразів (5.6) знайдемо постійні інтегрування,

$$C_1 = -\frac{2\omega}{t_1^2}; \quad C_2 = \frac{2\omega}{t_1}; \quad C_3 = 0; \quad C_4 = 0. \tag{3.8}$$

Після підстановки виразів (3.8) в (3.6) знайдемо залежності оптимального динамічного режиму пуску стрічкового конвеєра, які мінімізують критерій оптимізації.

З другого рівняння системи (2.8) виразимо координату першої зведеної маси динамічної моделі

$$\varphi_1 = \varphi_2 + \frac{J_2}{c} \ddot{\varphi}_2 + \frac{M_{p2}}{c}. \tag{3.9}$$

Після диференціювання за часом виразу (3.9), визначимо швидкість та прискорення обертання першої зведеної маси динамічної моделі

$$\dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi}_2 + \frac{J_{p2}}{c} \ddot{\varphi}_2 + \frac{M_{p2}}{c}; \tag{3.10}$$

$$\ddot{\varphi}_1 = \ddot{\varphi}_2 + \frac{J_{p2}}{c}. \tag{3.11}$$

Після цього знайдемо пружний момент в передавальному механізмі приводу та рушійний момент приводу стрічкового конвеєра, які мають вигляд:

$$M_p = J_{p2} \ddot{\varphi}_2 + M_{p2}; \tag{3.12}$$

$$M_d = J_{p1} \ddot{\varphi}_1 + J_{p2} \ddot{\varphi}_2 + M_{p2}, \tag{3.13}$$

Тут J_{p1}, J_{p2} – моменти інерції першої та другої зведених мас динамічної моделі стрічкового конвеєра,; M_{p2} – зведений до приводного барабана момент сил опору стрічки з вантажем; ω – кутова швидкість усталеного руху приводного барабана стрічкового конвеєра ;

Знайдемо також потужність на приводному барабані конвеєра

$$P_d = M_d \dot{\phi}_1.$$

5.3.Результати оптимізації режиму пуску стрічкового конвеєра

Після проведених розрахунків математичної моделі стрічкового конвеєра при оптимальному режимі руху побудовані графіки кінематичних характеристик процесу пуску, які представлені на рис. 3.1, рис. 3.2.

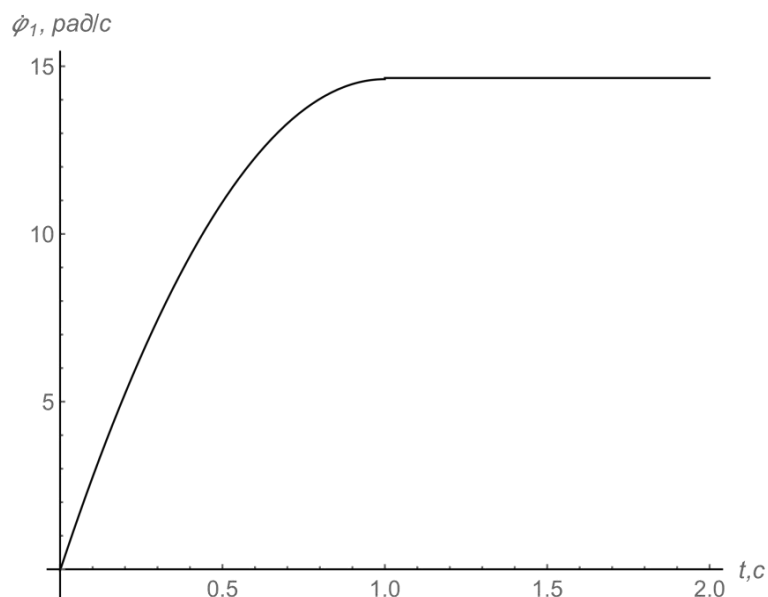


Рис. 3.1– Графік кутової швидкості першої зведеної маси оптимізованої моделі стрічкового конвеєра

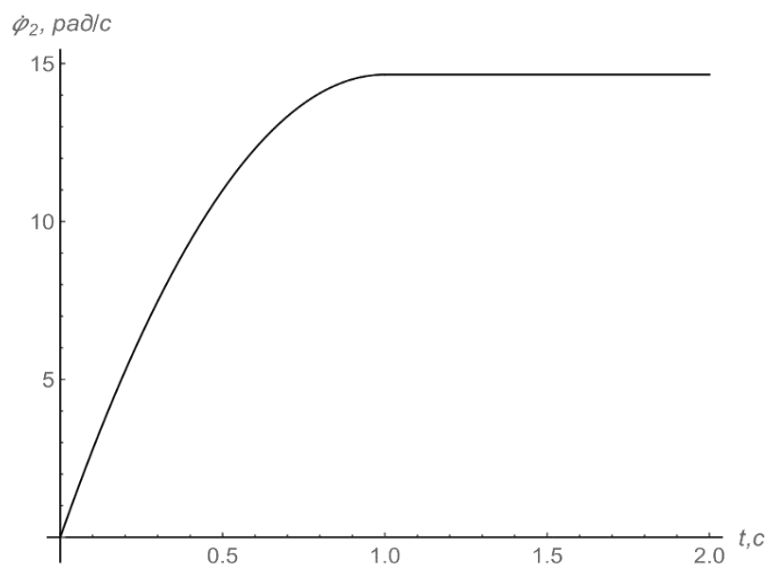


Рис. 3.2– Графік кутової швидкості другої зведеної маси оптимізованої моделі стрічкового конвеєра

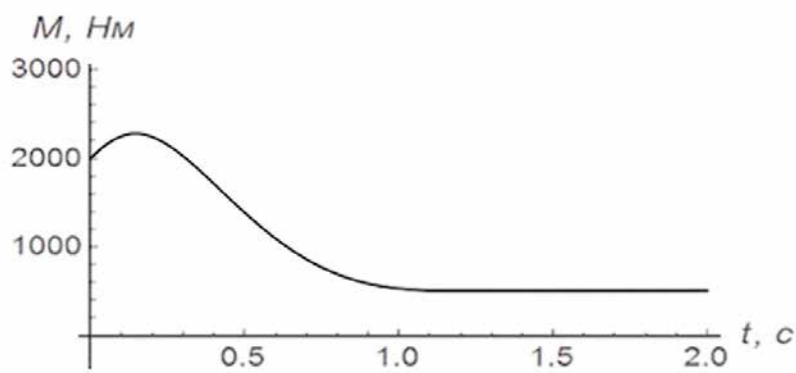


Рис. 2.3 – Графік оптимізованої зміни пружного моменту приводу стрічкового конвеєра

З представлених графіків швидкості першої, другої зведених мас та пружного моменту приводу динамічної моделі оптимального динамічного режиму пуску видно, що при цьому режимі відсутні коливання ланок стрічкового конвеєра. Такий оптимальний режим пуску стрічкового конвеєра приводить до мінімізації динамічних навантажень в його елементах.

РОЗДІЛ 4.

ОХОРОНА ПРАЦІ ПІД ЧАС РОБОТИ СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА

Проектування сучасних засобів механізації сільськогосподарського виробництва, таких як, конвеєри зернопереробних підприємств, пов'язані з вирішенням задач підвищення продуктивності та надійності обладнання [131]. В АПК витрати на транспортно-розвантажувальні роботи, переміщення та розподіл сипких вантажів становлять значну частку собівартості продукції, що зумовлює розвиток транспортуючих машин [131]. Покращення технологічних процесів та підвищення швидкостей переміщення зерна супроводжуються зростанням ризиків для життя і здоров'я персоналу [132].

Базовими нормативами для проектування безпечних умов праці при експлуатації конвеєрів на об'єктах зернопереробки є Закон України «Про охорону праці», положення якого деталізуються у «Правилах охорони праці для працівників, зайнятих на роботах зі зберігання та переробки зерна» (НПАОП 15.0-1.01-17) [133]. Ці правила поширюються на всі суб'єкти господарювання незалежно від форм власності, які здійснюють транспортування, очищення, сушіння та зберігання зернових культур [133]. Поряд із національними нормативно-правовими актами проектування машинобудівної продукції повинно спиратися на гармонізовані європейські стандарти ДСТУ EN 620:2022 (Підйимально-транспортуюче обладнання та системи неперервної дії. Конвеєри стрічкові стаціонарні для сипких матеріалів. Вимоги щодо безпеки) [134]. Даний стандарт регламентує вимоги до захисту від механічних загроз, електромагнітної сумісності приводних систем, а також визначає заходи запобігання пожежо- та вибухонебезпекам у заповнених зонах підприємств [135].

Функціонування стрічкових конвеєрів на об'єктах зберігання та переробки зерна супроводжується створенням низки специфічних небезпечних і шкідливих виробничих чинників, які за відсутності належного захисту приводять до

травматизму чи професійних захворювань [132]. Джерелом значної механічної небезпеки є відкриті рухомі елементи конструкції стрічкового конвеєра, зокрема зони набігання конвеєрної стрічки на приводний, натяжний та відхиляючі барабани [132]. Защемлення кінцівок або робочого одягу працівника у цих зонах характеризується важкими наслідками, що зумовлює обов'язковість встановлення суцільних чи сітчастих захисних огорож відповідно до вимог безпеки машинобудування [135]. Також небезпеку становлять підтримуючі роликоопори робочої та холостої гілок стрічки, контакт із якими під час руху машини може призвести до травмування [135].

Транспортування зернових матеріалів супроводжується інтенсивним виділенням пилу, який за своїми властивостями належить до вибухопожежонебезпечних середовищ [132]. Утворення пилоповітряної суміші у закритих приміщеннях, підконвеєрному просторі чи всередині розвантажувальних коробів створює постійну загрозу вибуху, який може бути ініційований найменшим джерелом теплової енергії [132]. Накопичення статичної електрики на рухомій гумотканинній стрічці, іскроутворення при терті металевих елементів у разі зміщення стрічки з осі або перегрів підшипникових вузлів через дефіцит мастила є каталізаторами вибуху пилу [132]. Зберігання зерна на складах із похилою підлогою та його подача на транспортер потребують постійної зачистки днищ від пилу перед кожним новим завантаженням, оскільки невиконання цієї вимоги різко підвищує концентрацію дрібнодисперсної органіки в повітрі робочої зони [137].

Окрім пожежної небезпеки, пиловий фактор чинить негативний вплив на органи дихання та зору працівників, викликаючи хронічні захворювання, що вимагає застосування засобів індивідуального захисту, таких як протипилові респіратори та захисні окуляри [133]. Постійними супутниками роботи потужних приводних станцій чотирікових конвеєрів є підвищені рівні шуму та вібрації, які походять від роботи електродвигунів, редукторів та незбалансованих роликів [138]. Тривалий вплив цих чинників спричиняє розвиток професійної приглухуватості та

вібраційної хвороби у обслуговчого персоналу [136]. Також існує небезпека падіння працівників з висоти під час обслуговування конвеєрних естакад та завальних ям, а також ризик потрапляння людей у відкриті люки бункерів чи силосів під час завантаження зерна [132].

Сучасні вимоги охорони праці та промислової безпеки унеможливають експлуатацію стаціонарних стрічкових конвеєрів без оснащення їх системами автоматичного контролю технічного стану та пристроями захисного вимкнення при виникненні аварійних відхилень від нормального технологічного режиму [132]. Для запобігання небезпечним режимам буксування стрічки, які супроводжуються інтенсивним тепловиділенням та можуть призвести до займання, обов'язковим є встановлення реле контролю швидкості [132]. Датчик швидкості фіксує кутову швидкість веденого барабана і передає сигнал на контроллер, який при зниженні швидкості стрічки нижче встановленого, автоматично вимикає живлення приводного електродвигуна [139].

Для запобігання боковому зміщенню стрічки, що викликає її пошкодження об металоконструкції рами та створює умови для іскроутворення, застосовують датчики сходу стрічки [140]. Контактуючи із кромкою стрічки при її відхиленні, ролик датчика відхиляється на певний кут, викликаючи спочатку подачу попереджувального сигналу на пульт оператора, а при подальшому критичному зміщенні – повну зупинку машини [141]. З метою гарантування безпеки людей уздовж усієї довжини конвеєра з обох боків монтуються кабель-тросові вимикачі аварійної зупинки, які дозволяють здійснити екстрене відключення обладнання вручну з будь-якого робочого місця [140].

Дослідження динамічних процесів транспортуючих машин свідчать, що перехідні режими (пуск/гальмування), є найбільш критичними фазами експлуатації стрічкових конвеєрів [5]. При пуску двигуна, крутний момент різко зростає, викликаючи динамічні зусилля в конвеєрній стрічці [5].

Таблиця 4.1. Тип захисного обладнання

Тип захисного обладнання	Конструктивне виконання та особливості	Принцип роботи та параметри налаштування	Сфера застосування та вимоги нормативних документів
Реле контролю швидкості стрічки	Безконтактний датчик в індуктивному або оптичному виконанні, стійкий до пилу та вологи (IP67)	Порівняння поточної частоти обертання веденого барабана з номінальною; вимкнення привода при просковзуванні стрічки понад 10%	Обов'язкове встановлення на всіх стаціонарних конвеєрах відповідно до вимог НПАОП 15.0-1.01-17 та ДСТУ EN 620:2022
Датчик контролю сходження стрічки	Герметичний алюмінієвий або сталевий корпус із поворотним роликком із нержавіючої сталі	Двоетапне реагування: попереджувальний сигнал при відхиленні на 5–15 мм; аварійний зупин при зсуві понад 20 мм	Монтується біля приводного та натяжного барабанів для унеможливлення пошкодження кромки та іскроутворення
Вимикач кабель-тросовий екстреного зупину	Механічний кінцевий вимикач двосторонньої дії з фіксацією у вимкненому стані	Спрацьовування при натягу або обриві сталевих тросів, прокладених вздовж конвеєра; миттєве розмикання ланцюга живлення	Обладнання проходів уздовж конвеєрних ліній відповідно до стандартів безпеки робочих місць ДСТУ EN ISO 13850
Датчик підпору зернового тракту	Контактний мембранний або ємнісний сенсор у пилозахисному вибухобезпечному виконанні	Фіксація накопичення зерна у розвантажувальному коробі або точці пересипання; відключення попереднього конвеєра в ланцюгу	Запобігання заклинюванню, просипанню зерна та перевантаженню приводної станції згідно з НПАОП 15.0-1.01-17

Це призводить до провисання стрічки між роликкоопорами, інтенсивного просипання транспортованого зерна та різкого збільшення натягу, що загрожує механічним руйнуванням стикових з'єднань [5]. З погляду охорони праці, різкий старт створює суттєві ризики для персоналу, який може перебувати поблизу конвеєра, через загрозу раптового викиду зернового пилу або обриву тягового органу [132].

Використання частотного регулювання дає змогу мінімізувати проковзування (буксування) стрічки на приводному барабані під час пуску завантаженого конвеєра [5]. Запобігання буксуванню є важливим для забезпечення пожежної безпеки на елеваторах, оскільки тривале тертя стрічки об нерухомий або такий, що обертається з меншою швидкістю, барабан призводить до нагрівання контактних поверхонь до

температур, здатних викликати тління та подальше займання зернового пилу [132]. Таким чином, рішення щодо оптимізації перехідних процесів конвеєрів є інструментом підвищення експлуатаційної надійності та пожежовибухобезпеки зернопереробних виробництв [5].

Забезпечення безпечної роботи стрічкових конвеєрів базується на дотриманні графіка планово-запобіжних ремонтів і регламенту технічного обслуговування [138]. Щоденний огляд конвеєра черговим персоналом перед початком зміни включає перевірку технічного стану стрічки, надійності кріплення захисних огорожень, відсутності сторонніх шумів та вібрацій у редукторі, електродвигуні, а також контроль чистоти робочого місця та відсутності просипів зерна [132]. Згідно з положеннями НПАОП 15.0-1.01-17, будь-які роботи з очищення, регулювання напрямку руху стрічки, підтягування натяжних пристроїв, а також ремонтні роботи дозволяється проводити виключно після повної зупинки конвеєра, відключення електроживлення та вивішування на пускових приладах попереджувальних плакатів типу «Не вмикати! Працюють люди» [133].

Для змащування на ходу, працівники мають використовувати спеціальні ручні шприци з подовженим жорстким носиком довжиною не менше 0,2 метра, що дозволяє тримати руки на безпечній відстані від рухомих частин привода [133]. Особливо жорсткі вимоги висуваються до стану самої конвеєрної стрічки, яка в процесі експлуатації підлягає негайному бракуванню та заміні або ремонту у разі виявлення дефектів (поздовжніх наскрізних пошкоджень стрічки довжиною понад 100 мм; поперечних наскрізних пошкоджень та надривів бокових кромek стрічки довжиною понад 20 мм; значного розшарування гумотканинного каркаса або зносу робочої гумової обкладки до оголення шарів тканини) [142].

Допуск підрядних організацій та власного ремонтного персоналу до виконання капітальних чи середніх ремонтів конвеєрного обладнання проводиться лише після оформлення наряду-допуску на виконання робіт з підвищеною небезпекою та проведення цільового інструктажу з охорони праці [138]. Усі

інструменти та пристосування, які використовуються під час монтажу чи ремонту конвеєрів у вибухонебезпечних зонах, мають бути виготовлені з кольорових металів або матеріалів, що унеможливають іскроутворення при ударах [132].

Раптове виникнення аварійних ситуацій на лінії стрічкового конвеєра вимагає від персоналу швидких, скоординованих і безпечних дій, спрямованих на збереження власного життя та мінімізацію матеріальних збитків [132]. Найбільш поширеними аварійними ситуаціями при транспортуванні зерна є розрив конвеєрної стрічки, заклинювання приводного барабана через потрапляння сторонніх предметів, забивання розвантажувального короба з подальшим підпором матеріалу, а також локальне загоряння пилу чи стрічки [132]. При виявленні будь-якої з цих ситуацій черговий оператор або працівник, що перебуває поблизу, зобов'язаний негайно здійснити аварійну зупинку конвеєра за допомогою найближчої кнопки «Стоп» або натяжного троса-виключателя [132].

Таблиця 4.2. Аварійні ситуації при роботі стрічкового конвеєра

Аварійна ситуація	Основні ознаки та первинні прояви	Першочергові дії оператора конвеєра	Заходи безпеки при ліквідації наслідків
Обрив або розшарування стрічки	Спрацьовування датчиків швидкості ДКС та сходу стрічки; нехарактерний шум, удари полотна об раму	Негайна зупинка привода кнопкою аварійного відключення; повідомлення диспетчера	Проводити ремонтні роботи або заміну стрічки лише при заблокованому пускачі та нульовому натягу
Заклинювання приводного барабана або редуктора	Спрацьовування теплового захисту двигуна; сильний запах горілої гуми через буксування стрічки	Екстремне вимкнення конвеєра; блокування пускової апаратури (LOTO)	Забороняється вручну повертати барабани або намагатися вивільнити заклинені деталі на ходу
Забивання та підпір зерна у точці пересипання	Спрацьовування датчика підпору; просипання зерна через краї короба; пиління	Зупинка конвеєра, що подає матеріал, а також попереднього технологічного обладнання	Очищення проводити за допомогою неіскристих лопат знизу вгору; обов'язкове використання респіратора
Локальне займання (пожежа) на конвеєрі	Виявлення диму або відкритого вогню; спрацьовування пожежної сигналізації	Повна зупинка конвеєрів та аспіраційних систем; виклик пожежної служби	Застосування вуглекислотних або порошкових вогнегасників; заборона запуску вентиляції до гасіння

При виконанні робіт у закритих приміщеннях з високою концентрацією пилу, працівники повинні обов'язково використовувати протипилові респіратори та захисні окуляри, а у виняткових випадках роботи всередині силосів чи бункерів – шлангові протигази та запобіжні пояси під наглядом не менше двох спостерігачів [137]. При виникненні пожежі негайна зупинка вентиляційних та аспіраційних систем є важливою, оскільки потік повітря може роздмухати тліючий пил та спровокувати об'ємний вибух пилоповітряної суміші у приміщенні [143].

Аналіз умов праці та рішень при експлуатації стрічкових конвеєрів для зерна показує, що безпека технологічного процесу залежить від динамічних параметрів приводної станції та рівня автоматизації обладнання [132]. Впровадження оптимальних законів пуску конвеєра, обґрунтованих науковими дослідженнями, дозволяє суттєво знизити пікові динамічні навантаження у тяговому органі, запобігти аварійному обриву стрічки та ліквідувати небезпеку її пожежонебезпечного буксування на приводному барабані [131]. Впровадження сучасних засобів автоматичного моніторингу, таких, як реле швидкості, датчики сходу стрічки та кабель-тросові вимикачі, у поєднанні з жорстким дотриманням міжремонтних інтервалів та алгоритмів безпечної поведінки персоналу при ліквідації аварій, дозволяє мінімізувати виробничі ризики та забезпечити відповідність транспортних систем вимогам ДСТУ EN 620:2022 та НПАОП 15.0-1.01-17 [133].

РОЗДІЛ 5.

ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ

Проектування та модернізація транспортуючих систем для агропромислового комплексу України вимагають комплексного аналізу, який поєднує дослідження динамічних процесів механічних систем із розрахунком їхньої економічної доцільності [145]. Оцінювання економічної ефективності стрічкового конвеєра проводиться шляхом порівняння його техніко-економічних параметрів із базовим варіантом конвеєра, що дозволяє обґрунтувати доцільність інвестицій в автоматизацію приводу [146].

Транспортування сипучих сільськогосподарських вантажів, таких, як зерно пшениці чи ячменю, характеризується значною нерівномірністю завантаження по стрічці протягом робочої зміни [147]. При насипній щільності зерна близько $0,65 \text{ т/м}^3$ та куті природного укосу в спокої 28° , продуктивність стрічкового конвеєра безпосередньо залежить від швидкості руху стрічки та площі її заповнення [147]. При розрахунку конвеєрних систем орієнтуємось на максимальну продуктивність до 500 т/год при потужності приводного електродвигуна $1,5 \text{ кВт}$ [147]. Проте в умовах прямого пуску завантаженого конвеєра від мережі виникають значні динамічні зусилля, які перевищують номінальні значення у кілька разів, викликаючи передчасний знос тягового елемента та передчасний вихід з ладу приводної станції [5]. Застосування сучасних математичних методів для оптимізації розгону стрічки, дозволяє знизити динамічний коефіцієнт пуску, що безпосередньо відбивається на зменшенні експлуатаційних витрат [5].

Проведення порівняльного аналізу базового конвеєра з прямим пуском двигуна та оптимізованої машини, оснащеної системою частотно-регульованого приводу, дозволяє наочно продемонструвати фінансові переваги модернізації [148]. Базовий варіант конвеєра має ринкову вартість 66000 грн. , проте його експлуатація супроводжується витратами на ремонти через часті поломки внаслідок пускових

ударів [149]. Оптимізований варіант передбачає інтеграцію частотного перетворювача CFM210 потужністю 1,5 кВт вартістю 6990 грн. та встановлення шафи керування з комплектом автоматики й датчиків безпеки вартістю 11010 грн. [148]. Додаткові капітальні витрати на автоматизацію збільшують загальну вартість обладнання до 84000 грн., але це здорожчання повністю компенсується зниженням поточних операційних витрат підприємства протягом першого року роботи.

При розрахунку експлуатаційних витрат враховано тарифи на електричну енергію для промислових споживачів другого класу напруги в Україні станом на 2026 рік складають 10,96 грн/кВт·год з урахуванням ПДВ, розподілу та передачі [150]. За умов двозмінного режиму роботи елеватора та річного наробітку конвеєра обсягом 2500 годин, базовий конвеєр споживає 3937,5 кВт·год електроенергії через неефективність перехідних процесів та часті зупинки під навантаженням [151]. Оптимізована система автоматично адаптує швидкість стрічки до миттєвого потоку зерна, знижуючи середнє енергоспоживання приводу до 1,1 кВт, що зменшує загальні річні витрати на енергоносії [149]. Результати порівняння техніко-економічних параметрів обох варіантів конвеєра наведено у таблиці 5.1.

Порівняльний аналіз демонструє, що впровадження системи оптимального пуску змінює структуру експлуатаційних витрат, перетворюючи додаткові початкові інвестиції на джерело постійної економії коштів підприємства.

Визначення фінансової доцільності модернізації базується на порівнянні річних експлуатаційних витрат для базового та оптимізованого варіантів конвеєра за методикою оцінювання нової техніки [146]. Річна економія операційних витрат формується за рахунок зменшення споживання електричної енергії, зниження витрат на капітальні ремонти, усунення витрат праці на прибирання просипів та повної ліквідації втрат зернового матеріалу при пуску [146]. За даними ринкового моніторингу у 2026 року середня вартість продовольчої пшениці в Україні складає 9982 грн/т з ПДВ [152]. Прямий пуск завантаженого базового конвеєра супроводжується різкими ривками стрічки, що призводить до просипання та

пошкодження в середньому до 1,5т зерна на рік, тоді, як плавний пуск оптимізованого конвеєра мінімізує ці втрати [148].

Таблиця 5.1. Техніко-економічні показники

Техніко-економічні показники стрічкового конвеєра	Базова конструкція приводу	Оптимізована конструкція приводу	Характер змін та інженерне обґрунтування
Первинна ринкова вартість конвеєра, грн	66 000	84 000	Збільшення витрат на 18000 грн через встановлення частотного перетворювача CFM210 та датчиків
Встановлена потужність електродвигуна, кВт	1,5	1,5	Потужність залишається незмінною відповідно до кінематичної схеми
Максимальна пропускна здатність, т/год	до 500	до 500	Продуктивність лімітується шириною стрічки та параметрами завантаження
Річні витрати на електричну енергію, грн	43 155	30 140	Економія 13015 грн на рік внаслідок оптимізації робочої швидкості та усунення пускових струмів
Розрахунковий термін служби стрічки, років	1,5	3,0	Збільшення ресурсу вдвічі завдяки усуненню пускових хвиль пружної деформації
Витрати на технічне обслуговування, грн/рік	16 500	4 500	Зниження витрат на 72,7% завдяки зменшенню зносу підшипників, стрічки, роликів та зубчастих передач
Прямі річні втрати зернового матеріалу, грн	14 973	0	Усунення просипання та пошкодження зерна завдяки плавному прискоренню стрічки при запуску
Витрати праці на прибирання та нагляд, грн/рік	4 000	0	Ліквідація ручної праці з очищення конвеєрної зони від просипаного зерна
Загальний строк експлуатації конвеєра, років	5	10	Подовження ресурсу машини завдяки зниженню втомних напружень у металоконструкції

Сукупні річні витрати на експлуатацію базової конструкції конвеєра обчислюються, як сума витрат на електроенергію, технічне обслуговування, оплату праці допоміжного персоналу та покриття втрат продукції, що становить 78628 грн/рік. Для оптимізованої машини сукупні річні експлуатаційні витрати знижуються до 34640 грн/рік, завдяки подвоєнню терміну служби конвеєрної стрічки та усуненню аварійних режимів [149]. Чиста річна економія операційних витрат від впровадження системи оптимального пуску визначається, як різниця між експлуатаційними витратами порівнюваних варіантів:

$$\Delta S = 78628 - 34640 = 43988 \text{ грн/ рік}$$

Величина додаткових капітальних інвестицій на модернізацію системи автоматичного керування приводом становить:

$$\Delta K = 84000 - 66000 = 18000 \text{ грн}$$

Термін окупності додаткових капітальних вкладень визначається відношенням вартості модернізації до отриманого річного економічного ефекту:

$$T_{ок} = \frac{\Delta K}{\Delta S} = \frac{18000}{43988} \approx 0,41 \text{ рік (приблизно 5 місяців)}$$

Розрахований термін окупності свідчить про високу комерційну привабливість проекту автоматизації, оскільки вкладені кошти повністю повертаються власнику менш ніж за один сезон збирання та переробки врожаю [149]. Збільшення загального строку служби конвеєра з 5 до 10 років створює додатковий довгостроковий економічний ефект, оскільки агропідприємство уникає капітальних витрат на придбання нової машини в середині розрахункового періоду [145].

Техніко-економічний аналіз модернізації стрічкового конвеєра показує високу ефективність застосування частотно-регульованого приводу для транспортування зерна [147]. Використання частотного перетворювача CFM210 та засобів автоматизації усуває динамічні удари, що дозволяє подовжити термін служби стрічки з 1,5 до 3 років та збільшити експлуатаційний ресурс усієї машини з 5 до 10 років [145]. Отриманий річний економічний ефект у розмірі 43988 грн. при додаткових інвестиціях 18000 грн. забезпечує окупність проекту модернізації всього за 5 місяців експлуатації [149]. Одночасно з фінансовими перевагами впровадження системи оптимального пуску гарантує повну відповідність вимогам охорони праці та стандартам безпеки, усуваючи ризики виникнення пожеж та травмування обслуговуючого персоналу елеватора та стрічкового конвеєра при транспортуванні зернових матеріалів [133].

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі на тему: «Оптимізація режиму пуску стрічкового конвеєра при транспортуванні зернових матеріалів» проведено дослідження динамічних характеристик стрічкового конвеєра при транспортуванні зернових матеріалів та визначено оптимальні режими пуску.

У першому розділі роботи проведено огляд конструктивних особливостей, класифікація та технічні характеристики стрічкових конвеєрів та їх елементів (приводів, підтримуючих роликів та натяжних систем), режими керування. Проведено аналіз літературних джерел присвячених динамічним дослідженням, а також розглянуто праці присвячені оптимізаційним дослідженням роботи стрічкових конвеєрів у наукометричних базах даних Scopus та Web of Science.

У другому розділі проведено динамічний аналіз руху стрічкового конвеєра, побудовано динамічну та математичну моделі руху стрічкового конвеєра та отримані графічні залежності кінематичних та силових характеристик, що дозволило визначити навантаження та закономірності зміни швидкостей.

У третьому розділі виконана оптимізація режиму пуску за критерієм середньоквадратичного значення пружного моменту в приводі стрічкового конвеєра та отримані графічні залежності кінематичних та силових характеристик при оптимальному режимі пуску стрічкового конвеєра, що забезпечує зменшення динамічних навантажень на елементи механізму та підвищення стабільності роботи системи.

У четвертому та п'ятому розділах розглянуто питання охорони праці під час роботи стрічкового конвеєра та проведено розрахунок економічної ефективності, оптимізованої конструкції стрічкового конвеєра при транспортуванні зернових матеріалів.

Запропоновані технічні рішення дозволяють мінімізувати динамічні навантаження на механізми, знизити енергоспоживання, підвищити надійність роботи приводних елементів та покращити ефективність функціонування стрічкового конвеєра при транспортуванні зернових матеріалів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Використання стрічкових конвеєрів в елеваторних комплексах. [Електронний ресурс]. Grain Capital. URL: <https://zeo.ua/> (дата звернення: 17.12.2025).
2. Ловейкін, В. С., Ромасевич, Ю. О., Човнюк, Ю. В., & Кадикало, І. О. (2019). Динаміка й оптимізація підйомно-транспортних машин: Монографія. Київ: ЦП КОМПІНТ, 292 с.
3. Belt conveyor technical specifications. [Електронний ресурс]. Grain Protech. URL: <https://grainprotech.com/> (дата звернення: 17.12.2025).
4. Стрічкові конвеєри для зерна. [Електронний ресурс]. New Elevator. URL: <https://new-elevator.com.ua/> (дата звернення: 17.12.2025).
5. Ловейкін, В., Ромасевич, Ю., Шалатовська, К., & Науменко, П. (2017). Оптимальне керування рухом стрічкового конвеєра у перехідних режимах. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини.
6. Реєстрація робочих параметрів [Електронний ресурс]. Київський Завод Підйомно-Транспортного Обладнання. URL: <https://kzpto.com.ua/uk/reystratsiya-robochykh-parametriv/> (дата звернення: 17.12.2025).
7. Види стрічкових конвеєрів та їх призначення. [Електронний ресурс]. Агробізнес сьогодні. URL: <http://agro-business.com.ua/> (дата звернення: 17.12.2025).
8. Транспортери (конвеєри) стрічкові. [Електронний ресурс]. ЛУБНИМАШ. URL: <https://lubnymash.com/> (дата звернення: 17.12.2025).
9. Стрічкові конвеєри Україна. [Електронний ресурс]. KONSORT. URL: <https://konsort.com.ua/> (дата звернення: 17.12.2025).
10. Guo, S., Huang, W., & Li, X. (2020). Normal force and sag resistance of pipe conveyor. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 33, 48. <https://doi.org/10.1186/s10033-020-00463-1>
11. Стрічковий конвеєр: види, характеристики та сфери застосування. [Електронний ресурс]. FarmVi. URL: <https://farmvi.com.ua/strichkovyj-konveyer-control/> (дата звернення: 20.12.2025).

12. Bin Fill Belt Conveyors. [Електронний ресурс]. Meridian Manufacturing. URL: <https://www.meridianmfg.com/> (дата звернення: 20.12.2025).
13. The golden rules of belt conveyor loadings and forces. [Електронний ресурс]. Beltcon. URL: <http://beltcon.org.za/> (дата звернення: 20.12.2025).
14. Пояснювальна записка до дипломного проекту. [Електронний ресурс]. Національний університет "Полтавська політехніка". URL: <http://reposit.nupp.edu.ua/> (дата звернення: 20.12.2025).
15. How to choose between a soft starter and a variable frequency drive. [Електронний ресурс]. Eaton. URL: <https://www.eaton.com/> (дата звернення: 20.12.2025).
16. Fluid couplings vs electronic soft starts. [Електронний ресурс]. Beltcon. URL: <http://beltcon.org.za/> (дата звернення: 20.12.2025).
17. Стрічковий конвеєр від виробника. [Електронний ресурс]. Кіровограделеватормаш. URL: <http://kirelmash.com.ua/> (дата звернення: 20.12.2025).
18. Heavy-Duty Industrial 480VAC Conveyor Systems. [Електронний ресурс]. Facility Functions. URL: <https://facilityfunctions.com/> (дата звернення: 20.12.2025).
19. Grain Conveyors and Storage Systems. [Електронний ресурс]. Custom Agri Systems, Inc. URL: <https://casindustries.com/> (дата звернення: 20.12.2025).
20. Soft Start vs. VFD for Motor Control Applications. [Електронний ресурс]. Industrial Monitor Direct. URL: <https://industrialmonitordirect.com/> (дата звернення: 17.01.2026).
21. Стрічки конвеєрні гумотканинні шахтні та загального призначення. [Електронний ресурс]. ПП KSV. URL: <https://www.ksv.biz.ua/search/?q=Стрічки+конвеєрні+гумотканинні&t=0> (дата звернення: 17.01.2026).
22. ДСТУ EN 14973:2019 Стрічки конвеєрні для використання в підземному обладнанні. Вимоги щодо електричної та пожежної безпеки. [Електронний ресурс]. Будстандарт. URL: <http://online.budstandart.com/> (дата звернення: 17.01.2026).

23. ISO 5048:1989 Continuous mechanical handling equipment – Belt conveyors with carrying idlers – Calculation of operating power and tensile forces. (1989). ISO.
24. Стартовий елеватор [Електронний ресурс]. Grain Capital. URL: <https://zeo.ua/elevator/startoviy-elevator> (дата звернення: 17.01.2026).
25. Склад зберігання [Електронний ресурс]. Grain Capital. URL: <https://zeo.ua/elevator/sklad-zberigannya> (дата звернення: 17.01.2026).
26. Стрічковий конвеєр відкритого типу ZEO-BC [Електронний ресурс]. Grain Capital. URL: <https://zeo.ua/equipment/strichkoviy-konveyer-vidkritogo-tipu-zeo-bc> (дата звернення: 17.01.2026).
27. Стрічковий конвеєр закритого типу ZEO-BCE [Електронний ресурс]. Grain Capital. URL: <https://zeo.ua/equipment/strichkoviy-konveyer-zakritogo-tipu-zeo-bce> (дата звернення: 17.01.2026).
28. Мобільний стрічковий конвеєр ZEO-BC-RM [Електронний ресурс]. Grain Capital. URL: <https://zeo.ua/equipment/mobilniy-strichkoviy-konveyer-zeo-bc-rm> (дата звернення: 17.01.2026).
29. Roach Screw Type Auxiliary Take-Up for Live Rollers [Електронний ресурс]. TCE Conveyors. URL: <https://www.tceconveyors.com/roach-screw-type-auxiliary-take-up-for-live-rollers> (дата звернення: 17.01.2026).
30. Gravity Take-Ups [Електронний ресурс]. Omara Ag. URL: <https://omara-ag.com/omara-products/gravity-take-ups/> (дата звернення: 17.01.2026).
31. Pihnastyi, O. M., & Cherniavska, S. M. (2021). Analysis of stress in the conveyor belt (Maxwell–element model). *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2021(4), 74–81. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-4/074>
32. Bortnowski, P., Gładysiewicz, L., Król, R., & Ozdoba, M. (2021). Models of transverse vibration in conveyor belt–investigation and analysis. *Energies*, 14(14). <https://doi.org/10.3390/en14144153>
33. Sakharwade, S. G., & Nagpal, S. (2019). Analysis of transient belt stretch for horizontal and inclined belt conveyor system. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 4(5), 1169–1179. <https://doi.org/10.33889/IJMEMS.2019.4.5-092>

34. Pihnastyi, O., Khodusov, V., Kozhevnikov, G., & Bondarenko, T. (2021). Analysis of dynamic mechanic belt stresses of the magistral conveyor. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 164–173. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5_19
35. Khodusov, V., Pihnastyi, O., & Kozhevnikov, G. (2021). The dynamic model of conveyor belt stresses. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 118–127. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68014-5_14
36. Pihnastyi, O., & Cherniavska, S. (2021). Using the asymptotic approximation of the Maxwell element model for the analysis of stress in a conveyor belt. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(7), 77–84. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.247526>
37. Sun, X., Xiao, H., & Meng, W. (2024). Research on the tension of steel cord conveyor belts based on transverse vibration modelling. *Measurement Science and Technology*, 35(3). <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad180d>
38. Zhang, Y., Li, Q., & Jia, X. (2026). Dynamic analysis of nonlinear models for long-distance belt conveyors with multi motor drives. *Nonlinear Dynamics*, 114, 556–572. <https://doi.org/10.1007/s11071-026-12416-9>
39. Pihnastyi, O., Kozhevnikov, G., & Vasyuchenko, P. (2022). Analysis of dynamic stresses during acceleration and deceleration of a conveyor belt (Maxwell element model). *Lecture Notes in Networks and Systems*, 367, 248–259. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5_24
40. Tupkar, R., Kumar, D., & Sakhale, C. (2025). Development of a mathematical model for belt stretch using transient dynamics of medium-duty polyvinyl chloride-based belt conveyors. *Nigerian Journal of Technology*, 44(2). <https://doi.org/10.4314/njt.v44i2.10>
41. Wang, Z., Zhang, Y., Wang, C., Sun, Q., & Zhu, Y. (2026). Vertical coupling dynamics of carriage and rail joint in carriage belt conveyors. *Engineering Research Express*. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ae2c45>
42. Shi, H., Sun, C., Yao, W., Wang, Z., Li, Z., & Zhang, H. (2025). Mechanical properties of track joints of wheel-rail type belt conveyor under dynamic loading.

Lecture Notes in Electrical Engineering, 1432, 642–653.
https://doi.org/10.1007/978-981-96-7441-1_63

43. Tupkar, R., Kumar, D., Sakhale, C., & Shelare, S. (2025). Optimizing belt tension and stretch dynamics: A modeling approach for medium-duty conveyor systems. *Engineering Research Express*. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/adce55>
44. Shi, H., Shi, C., Sun, C., Li, Z., & Song, L. (2025). Research on longitudinal dynamic characteristics of wheel-rail belt conveyor under impact load. *Journal of Sound and Vibration*. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2025.119070>
45. Hao, N., Sun, B., & Yu, C. (2026). Analysis and research on the vibration characteristics of carriage belt conveyors under different working conditions. *Experimental Techniques*. <https://doi.org/10.1007/s40799-025-00863-9>
46. Sun, X., Xiao, H., & Meng, W. (2024). Research on the tension of steel cord conveyor belts based on transverse vibration modelling. *Measurement Science and Technology*, 35(3), 035028. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad180d>
47. Zhao, X., Meng, W., & Zhou, L. (2019). Research on Indentation Rolling Resistance Based on Viscoelasticity of Cover Rubber under a Conveyor Belt. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019, Article 1781427. <https://doi.org/10.1155/2019/1781427>
48. Chen, H., Xu, R., & Mao, J. (2020). The viscoelastic model of steel wire rope rubber conveyor belt and the analysis of depression resistance under the influence of temperature. *Journal of Mechanical Strength*, 42(3), 680–687. <https://doi.org/10.16579/j.issn.1001.9669.2020.03.025>
49. Pihnastyi, O. M., & Cherniavska, S. M. (2021). Analysis of stress in the conveyor belt (Maxwell–element model). *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2021(4), 74–81. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-4/074>
50. Janík, R., Labaj, I., Ondrušová, D., Pajtášová, M., Marasová, D., Kohutiar, M., & Matušíková, P. (2026). Viscoelastic properties of rubber compounds for belt conveyor support systems. *Polimery*, 71(1), 53–62. <https://doi.org/10.14314/polimery.2026.1.6>

51. Chen, H., Zhang, K., & Li, E. (2017). Parameter identification and analysis on the constitutive model of wire rope rubber conveyor belts. *Journal of Vibration and Shock*, 36(14), 234–238. <https://doi.org/10.13465/j.cnki.jvs.2017.14.037>
52. Munzenberger, P. J., O'Shea, J. I., & Wheeler, C. A. (2019). A comparison of rubber stress relaxation models for conveyor belt indentation rolling resistance calculations. *International Journal of Mechanical Materials in Design*, 15, 213–224. <https://doi.org/10.1007/s10999-018-9412-y>
53. Chen, H., & Liu, S. (2023). Establishment of constitutive model and dynamic parameter analysis of rubber conveyor belt. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 61(2), 365–378. <https://doi.org/10.15632/jtam-pl/163246>
54. Opasiak, T., & Peruń, G. (2016). Influence of construction the rollers c type on resistance of rotating driven system of the belt conveyor. *Diagnostyka*, 17(1), 81–86.
55. Chen, H., Zhang, K., Piao, M., et al. (2018). Dynamic analysis of indentation rolling resistance of steel cord rubber conveyor belt. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 32, 4037–4044. <https://doi.org/10.1007/s12206-018-0803-7>
56. Bin, G., Zhang, W., Li, X., & Ye, G. (2017). Dynamic contact force analysis considering pipe conveyor belt elasticity. *Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society*, 42(9), 2483–2490. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2017.0060>
57. Shen, J., Wheeler, C., Ilic, D., & Chen, J. (2019). Application of open source FEM and DEM simulations for dynamic belt deflection modelling. *Powder Technology*, 357, 171–185. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.08.068>
58. Munir, H. A., Zakaria, A., Ponniran, A., Rahman, M. T. A., & Marimuthu, T. (2022). Investigation of the dynamic deflection of conveyor belts via simulation modelling methods on idler factor. *Journal of Physics: Conference Series*, 2312(1), 012027. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2312/1/012027>
59. Guo, S., Huang, W., & Li, X. (2020). Normal force and sag resistance of pipe conveyor. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 33, 48. <https://doi.org/10.1186/s10033-020-00463-1>

60. Wang, S., Li, D., & Hu, K. (2019). Analysis and experimental study on pressure characteristics of supporting roller group of pipe belt conveyor. *Shock and Vibration*, 2019, Article 7061847. <https://doi.org/10.1155/2019/7061847>
61. Zhu, Q. (2025). Numerical Simulation Analysis on Chute Structure of Belt Conveyor. 2025 IEEE 5th International Conference on Applied Mathematics, Modeling and Computer Simulation (AMMCS), 1–4. <https://doi.org/10.1109/AMMCS65761.2025.11459901>
62. Andrejiova, M., Grincova, A., Marasova, D., & Kimakova, Z. (2025). Machine Learning Methods as a Tool for Analysis and Prediction of Impact Resistance of Rubber–Textile Conveyor Belts. *Applied Sciences*, 15(15), 8511. <https://doi.org/10.3390/app15158511>
63. Grincova, A., Andrejiova, M., & Marasova, D. (2016). Failure analysis of conveyor belt in terms of impact loading by means of the damping coefficient. *Engineering Failure Analysis*, 68, 210–221. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.06.006>
64. Marasová, D., Ambriško, L., Andrejiová, M., & Grinčová, A. (2017). Examination of the process of damaging the top covering layer of a conveyor belt applying the FEM. *Measurement*, 112, 47–52. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.08.016>
65. Grincova, A., Andrejiova, M., & Marasova, D. (2015). Measuring and comparative analysis of the interaction between the dynamic impact loading of the conveyor belt and the supporting system. *Measurement*, 10.1016/j.measurement.2014.09.032.
66. Andrejiova, M., Grincova, A., & Marasova, D. (2020). Monitoring dynamic loading of conveyer belts by measuring local peak impact forces. *Measurement*, 158, 107690. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107690>
67. Liu, X., Pang, Y., & Lodewijks, G. (2015). A stress discontinuity approach to model the stress profile on a loaded conveyor belt. *Powder Technology*, 278, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.12.040>
68. Schoeller, H., Chemnitz, R., Koltai, P., Engel, M., & Pfahl, S. (2025). Assessing Lagrangian coherence in atmospheric blocking. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 32, 51–73. <https://doi.org/10.5194/npg-32-51-2025>

69. Li, D.-Y., Wang, S., & Hu, K. (2017). Mechanical analysis and research of the conveyor belt of plane turning belt conveyor based on discrete element method. *Archives of Transport*, 41(1), 55–62. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0009.7386>
70. Andrejiova, M., Grincova, A., & Kimakova, Z. (2019). Quality assessment of the rubber-textile conveyor belts at the dynamic impact loading. *Quality - Access to Success*, 20(168), 28–32
71. Ku, J., Lei, Z., Xia, J., Guo, B., Chen, H., Peng, X., Ran, H., & Deng, R. (2021). Dynamic behavior and separation prediction of magnetic ore bulks in dry medium-intensity magnetic separator. *Minerals Engineering*, 171, 107113. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107113>
72. Nayak, M., Saha, S. C., & Kumar, N. R. (2026). Reliability Improvement of Conveyors by Resolving Drive Vibration Due to Structural Problems. In A. Andhare & P. Ganesh Kumar (Eds.), *Recent Advances in Condition Monitoring. NCCM 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering* (pp. 145–158). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-96-5791-9_19
73. Jovanović, M. L., Radoičić, G. N., Milić, P. D., & Maneski, T. (2018). With frequency simulation to design the monitoring of frame structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 393(1), 012039. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/393/1/012039>
74. Marasova, D. (2018). The importance of correct specification of tribological parameters in dynamical systems modelling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 294(1), 012039. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/294/1/012039>
75. Suvanjumrat, C., Suwannahong, W., & Thongkom, S. (2017). Implementation of Multi-Body Dynamics Simulation for the Conveyor Chain Drive System. *MATEC Web of Conferences*, 95, 06006. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179506006>
76. Wang, Z., Zhang, Y., Sun, C., Chang, X., & Wang, C. (2025). Nonlinear dynamic characteristics of carriage belt conveyors on small-radius curves. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 173, 105139. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2025.105139>

77. Hao, N., Yi, X., Zhang, Y., Chang, X., Liu, J., Wang, Z., & Zhang, J. (2024). Research on dynamic characteristics of the turnover system of rail belt conveyor. *Measurement Science and Technology*, 35(2), 025116. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad0959>
78. Shi, H., Li, Z., Liu, Jinshan., Sun, C., Jia, X., & Hou, Y. (2024). Dynamic Characteristics and Experimental Study of Rail Belt Conveyor Operation Process. *Advances in Transdisciplinary Engineering*, 53, 288–295. <https://doi.org/10.3233/ATDE240254>
79. Góra, G., Iwaniec, M., Kulinowski, P., & Gac, K. (2020). Vibration impact on people transported by mining belt conveyors. *Vibrations in Physical Systems*, 31(1), 2020109.
80. Romasevych, Yu., Loveikin, V., Kulpin, R. A., & Pundyk, K. R. (2021). Research of dynamic and energy processes of belt conveyors under control with soft starter. *Machinery & Energetics*, 12(1), 75–82.
81. Feng, Y., Zhang, M., Li, Guoping., & Meng, Guoyinga. (2020). Dynamic characteristic analysis and startup optimization design of an intermediate drive belt conveyor with non-uniform load. *Science Progress*, 103(1), 1–18. <https://doi.org/10.1177/0036850419881089>
82. Wang, Y., Li, S.-J., Zhao, W.-Y., & Meng, W.-J. (2017). Experimental and theoretical analysis of static and dynamic characteristic of linear motor used in belt conveyor. *Chinese Journal of Engineering Design*, 24(3), 303–310. doi: 10.3785/j.issn.1006-754X.2017.03.009.
83. Yang, M., Jiang, W., Bao, J., & Lian, K. (2025). Simulation and analysis of the electro-hydraulic coordinated system for the disc brake system in mining belt conveyor. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 53(2), 1105–1119. <https://doi.org/10.1080/15397734.2024.2379047>
84. Polishchuk, L., Kharchenko, Y., Piontkevych, O., & Koval, O. (2016). Research of dynamic processes in the control system of the hydraulic drive of belt conveyors with variable cargo flows. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(8(80)), 22–29. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65930>

85. Bertolino, A. C., Lombardi, G., Mauro, S., & Sorli, M. (2020). Modelling of energy accumulation in belt conveyor systems under faulty conditions. Proceedings of the ASME 2020 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 7B: Dynamics, Vibration, and Control. Virtual, Online. <https://doi.org/10.1115/IMECE2020-23622>
86. Golovanevskiy, V., & Kondratiev, A. (2025). Conveyor belt restraining in natural hazardous wind events. Scientific Reports, 15, 06135. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-06135-1>
87. Wang, W., Liu, H., Yang, B., et al. (2023). Pyrolysis characteristics and dynamics analysis of a coal mine roadway conveyor belt. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 148, 4823–4832. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11753-2>
88. He, D., Pang, Y., & Lodewijks, G. (2017). Green operations of belt conveyors by means of speed control. Applied Energy, 188, 330–341. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.12.017.
89. Mosadegh, H., Fatemi Ghomi, S. M. T., & Süer, G. A. (2017). A control theoretical modelling for velocity tuning of the conveyor belt in a dynamic mixed-model assembly line. International Journal of Production Research, 55(24), 7473–7495. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1370150>
90. Huang, Y. (2025). Research on Speed Monitoring and Control Methods in Industrial Conveyor Systems Subtitle. 2025 5th International Conference on Electrical Engineering and Control Science (IC2ECS), 743–747. doi: 10.1109/IC2ECS68700.2025.11362324.
91. Wang, Z. (2025). Adaptive Finite Time Control of Mobile Belt Conveyor System with Multi-Source Uncertainties and Disturbances. 2025 International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM), 851–856. doi: 10.1109/ICARM65671.2025.11293734.
92. Du, X., Sun, G., & Zhang, H. (2025). Research on Precise Positioning Sliding Mode Control of Belt Conveyor Unloading Vehicle Based on RBFNN. Journal of Physics: Conference Series, 3059(1), 012004. doi: 10.1088/1742-6596/3059/1/012004.

93. Yang, X., Ge, S., Zu, H., Bao, J., Chang, G., Zhang, L., & Li, H. (2020). Permanent magnet intelligent drive system and control strategy of belt conveyor. *Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society*, 45(6), 2116–2126. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.ZN20.0345.
94. Liu, J., Qin, H., Wang, G., & Zhao, H. (2021). Control Algorithm of Permanent Magnet Direct Drive Belt Conveyor System for Mining Based on Reduced Order Model. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 35(14), 2159052. doi: 10.1142/S0218001421590527.
95. Kulikov, A., Kaverin, V., & Mosavi, A. (2024). Simulation of an electric conveyor drive using Simulink Matlab. 2024 IEEE 22nd World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI), 000513–000518. doi: 10.1109/SAMI60510.2024.10432904.
96. Pihnastyi, O. M. (2019). Control of the belt speed at unbalanced loading of the conveyor. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2019(6), 122–129. doi: 10.29202/nvngu/2019-6/18.
97. Yang, C.-Y., Bu, L.-Ch., & Chen, B. (2024). An Operation Optimization Method for Long Distance Belt Conveyors Driven by Digital Twin. *Zidonghua Xuebao/Acta Automatica Sinica*, 50(11), 2204–2218. doi: 10.16383/j.aas.c210979.
98. Wang, Z., & Feng, B. (2024). Research on Dynamic Analysis and Optimization of Belt Conveyor Based on Intelligent Algorithm and Big Data Algorithm. 2024 Third International Conference on Distributed Computing and Electrical Circuits and Electronics (ICDCECE), 1–4. doi: 10.1109/ICDCECE60827.2024.10548384.
99. Bekmyrza, Z., Salykov, B., Ryspayev, K., & Kurmanov, A. (2023). Improving the design and operating parameters of the belt conveyor for working with heavily impure grain crops. *International Journal of GEOMATE*, 25(109), 173–180. <https://doi.org/10.21660/2023.109.m2318>
100. Song, G., & Song, W. (2017). Determination and review on calculation method of cross-sectional area of carrying material at belt conveyor. *Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society*, 42(2), 556–561. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2017.0531.

101. Man, Y., Xian, W., Pan, S., & Xia, Z. (2025). Analysis of automatic control strategy for belt conveyor tensioning device. *Journal of Physics: Conference Series*, 3019(1), 012008. doi: 10.1088/1742-6596/3019/1/012008.
102. Wang, W., Qin, J., & Wangheng. (2018). Research on the influence of tensioning device in the dynamic process of belt conveyor. *Proceedings of the International Symposium on Big Data and Artificial Intelligence (ISBDAI '18)*, 186–190. <https://doi.org/10.1145/3305275.3305312>
103. Кан, Ц., Чжан, Г., Чжао, Ч., Лю, В., Тан, Н., & Лю, Х. (2025). Розробка та експеримент спрямованого розвантажувального пристрою з гнучким стрічковим затискачем для *Allium chinense*. *Праці Китайського товариства сільськогосподарської техніки*, 56(5), 246–256. doi: 10.6041/j.issn.1000-1298.2025.05.023.
104. Jia, H., Wu, K., & Wang, Y., & Sun, Y. (2020). Conveyor belt structure of belt dryer: Analysis and optimization. *Engineering Failure Analysis*, 115, 104686. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104686>
105. Heubach, T., & Tietyen, A. (2016). Selection, installation and operation of backstops in belt conveyor systems. *ICBMH 2016 - 12th International Conference on Bulk Materials Storage, Handling and Transportation, Proceedings*, 253–262.
106. Wheatley, G. (2020). Design of a hydraulically controlled conveyor belt clamp for heavy-duty drift belt installation in underground applications: a case study. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, 5(3), 171–182. <https://doi.org/10.1080/24705314.2020.1765267>
107. Hao, N., Liu, M., Zhong, Z., Liu, Y., Sun, B., Yi, X., & Zhang, Y. (2026). Research on contact mechanics characteristics in the transition section of pipe belt conveyor. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 54(1), 12–25. <https://doi.org/10.1080/15397734.2025.2584329>
108. Чень, В., Лі, Ц., Ши, Ц., та ін. (2024). Побудова та застосування моделі цифрового двійника інтелектуальної стрічкової конвеєрної системи з багатоцільовою оптимізацією. *Вугільна наука та технології*, 52(12), 287–299. DOI: 10.12438/cst.2023-1750

109. Mustafa, M. H. (2020). An engineered amelioration and sustainability enhancement technique for performance upgrading of a mechanical system. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 43(5), 57–64.
110. Aruldass, L., & S, R. (2025). Health monitoring of industrial conveyor systems using causality-based fault detection and ELM classification. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*. <https://doi.org/10.1007/s13198-025-03074-y>
111. Song, H., Jiang, F., Ni, Y., Huang, T., & Jiang, Z. (2025). Remaining Life Prediction Method of Belt Conveyor Roller Bearings Based on RVM-Adaboost. 2025 44th Chinese Control Conference (CCC), 5452–5457. doi: 10.23919/CCC64809.2025.11179406.
112. Jiang, F., Cheng, S., Zhu, Z., Zhou, G., Li, Q., Liu, Q., & Song, H. (2025). Fault Diagnosis Method of Belt Conveyors Idlers Based on CLSRIME-XGBOOST. *Zhendong Ceshi Yu Zhenduan/Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis*, 45(4), 666–673. doi: 10.16450/j.cnki.issn.1004-6801.2025.04.005.
113. Zhang, Q., Bing, J., Tian, Y., et al. (2025). Fault diagnosis of belt conveyor gearboxes based on Vibration signal processing and IPSO-optimized LSSVM. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 47, 588. <https://doi.org/10.1007/s40430-025-05927-w>
114. Li, M., Zhang, W., & Zhao, R. (2025). Conveyor Belt Runout Detection System Based on Machine Vision. 2025 2nd International Conference on Advanced Control Systems and Automation Technology (ACSAT), 1–5. doi: 10.1109/ACSAT68407.2025.11407286.
115. Wu, Xiangfana., Wang, C., Tian, Z., Huang, X., & Wang, Q. (2023). Research on Belt Deviation Fault Detection Technology of Belt Conveyors Based on Machine Vision. *Machines*, 11(12), 1033. <https://doi.org/10.3390/machines11121039>
116. Liu, X., He, Z., Shen, Y., Hua, D., Wang, T., & Liu, X. (2025). An Improved Pruning Method with Sparsification of Foreign Object Detection Model for Belt Conveyor. 2025 International Conference on Equipment Intelligent Operation and Maintenance (ICEIOM), 17–26. doi: 10.1109/ICEIOM65271.2025.11239830.

117. Hong, Y., Wang, L., Su, J., et al. (2025). Enhanced foreign body detection on coal mine conveyor belts using improved DLEA and lightweight SARC-DETR model. *Signal, Image and Video Processing*, 19, 349–358. <https://doi.org/10.1007/s11760-025-03922-1>
118. Chen, L., Wu, Ligang., & Ren, Q. (2025). A multimodal data fusion-based intelligent detection method for lump coal on underground conveyor belts in smart manufacturing. *Journal of Industrial Information Integration*, 43, 100997. doi: 10.1016/j.jii.2025.100997.
119. Zhou, H., Wu, T., Sun, K., Wu, J., & Deng, B. (2026). Task-oriented multi-scale dynamic feature fusion for robust conveyor belt monitoring. *Information Fusion*, 114, 103722. doi: 10.1016/j.inffus.2025.103722.
120. Li, X., Zhang, Y., Li, Y., Zhan, Y., & Yang, L. (2021). Health State Prediction and Performance Evaluation of Belt Conveyor Based on Dynamic Bayesian Network in Underground Mining. *Shock and Vibration*, 2021, Article 6699611. <https://doi.org/10.1155/2021/6699611>
121. Liu, X., Zhou, C., Jiang, W., He, H., & Liu, H. (2024). Risk assessment of belt conveyor belt in thermal power plant based on Bow-tie model and uncertainty Fuzzy Dynamic Bayesian Network. *Journal of Physics: Conference Series*, 2903(1), 012017. doi: 10.1088/1742-6596/2903/1/012017.
122. Chen, W., Shen, J., Zhu, H., & Xu, P. (2025). Interpretable fault diagnosis of coal-mine conveyor-belt idler bearings using multi-source fusion diagrams and mobile residual soft threshold–MobileViT. *Ain Shams Engineering Journal*, 16, 103777. doi: 10.1016/j.asej.2025.103777.
123. Yuan, Y., Bai, Y., Meng, W., Zhou, L., Wang, M., et al. (2025). Research on conveyor belt damage detection method based on FDEP–YOLOv8. *Scientific Reports*, 15, 20391. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-20391-1>
124. Mishra, C. S. K., & Guzzarlapudi, S. D. (2026). Simplified alternative approach to freight mode choices for mineral commodities using integrated MCDM techniques. *Innovative Infrastructure Solutions*, 11, 251. <https://doi.org/10.1007/s41062-026-02635-9>

125. Bobinics, B., & Marasová, D. (2025). Comparative study of software tools for simulation and design of transport systems. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*, 25(1.1), 245–252. <https://doi.org/10.5593/sgem2025/1.1/s03.32>
126. Wang, X., & Mu, D. (2019). Dynamic model research and Intelligent system development of belt conveyor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 493(1), 012101. doi: 10.1088/1757-899X/493/1/012101.
127. Pihnastyi, O. M., Khodusev, V. D., & Kotova, A. V. (2023). Mathematical model of a long-distance conveyor. *Mining Science*, 30, 27–43. <https://doi.org/10.37190/msc233002>
128. Zhu, H., Zhu, W. D., & Fan, W. (2021). Dynamic modeling, simulation and experiment of power transmission belt drives: A systematic review. *Journal of Sound and Vibration*, 491, 115759. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115759>
129. Koodtalang, W., & Thong-Un, N. (2021). The comparison of methods for mass measurement on the continuing movement conveyor using digital processor. 2021 Research, Invention, and Innovation Congress: Innovation Electricals and Electronics (RI2C), 336–339. doi: 10.1109/RI2C51727.2021.9559820.
130. Cao, Y., Tang, Z., Lu, D., & Lin, S. (2024). Performance test of artificial defoliating broccoli conveyor line and analysis of defoliating broccoli inflorescences. *Agronomy*, 14(9), 1925. <https://doi.org/10.3390/agronomy14091925>.
131. Розробка конструкції ковшового конвеєра для переміщення зерна. [Електронний ресурс]. НУБіП України. URL: <https://dglb.nubip.edu.ua/bitstreams/46893f19-6ddc-46ab-8286-6b9d5194463a/download> (дата звернення: 14.03.2026).
132. Дотримання вимог охорони праці на елеваторах. [Електронний ресурс]. Охорона праці. URL: <https://pro-op.com.ua/article/17358-dotrimannya-vimog-okhoroni-pratsi-na-elevatorakh> (дата звернення: 14.03.2026).
133. НПАОП 15.0-1.01-17 Правила Охорони Праці Для Працівників, Зайнятих На Роботах Зі Зберігання Та Переробки Зерна. [Електронний ресурс]. Державна служба України з питань праці. URL:

- https://education.profitteh.kiev.ua/pluginfile.php/267/mod_page/content/137/НПАО_П%2015.0-1.01-17%20Правила%20ОП%20для%20працівників%2С%20зайнятих%20на%20роботах%20зі%20зберігання%20та%20переробки%20зерна.pdf (дата звернення: 14.03.2026).
134. ДСТУ EN ISO 14122-1:2018 Безпечність машин. Стаціонарні засоби доступу до машин. [Електронний ресурс]. Частина 1. Вибір фіксованих засобів та загальні вимоги доступу (EN ISO 14122-1:2016, IDT). Будстандарт. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79363 (дата звернення: 14.03.2026).
135. ДСТУ EN 620:2013 Підіймально-транспортувальне устаткування та системи безперервної дії. Конвеєри стрічкові стаціонарні для сипких матеріалів. [Електронний ресурс]. Вимоги щодо безпеки та електромагнітної сумісності (EN 620:2002 +... - БУДСТАНДАРТ Online. Будстандарт. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=65626 (дата звернення: 14.03.2026).
136. Пістун, І. П., Стець, Р. Є., Трунова, І. О. (2011). Охорона праці в галузі (для студентів інженерних спеціальностей). ВНТУ. [Електронний ресурс]. URL: http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2020/Pistun_2011_557.pdf (дата звернення: 14.03.2026).
137. Вимоги безпеки під час переробки та зберігання зерна. [Електронний ресурс]. Охорона праці. URL: <https://ohoronapraci.com.ua/articles/67355-vymohy-bezpeky-pid-chas-pererobky-ta-zberihannya-zerna> (дата звернення: 14.03.2026).
138. Про затвердження Положення про технічне обслуговування устаткування підприємств гірничо-металургійного комплексу від 15.06.2004 | LIGA:ZAKON - ІПС ЛІГА:ЗАКОН. [Електронний ресурс]. Міністерство промислової політики України. URL: <https://ips.ligazakon.net/document/REG9406> (дата звернення: 14.03.2026).

139. Надійне конвеєрне обладнання від виробника. [Електронний ресурс]. Завод конвеєрного обладнання. URL: <https://konveeri.com.ua/> (дата звернення: 14.03.2026).
140. Купити CBMS-AL Датчик сходу стрічки конвеєра від «Ремікс. [Електронний ресурс]. Компанія Ремікс. URL: <https://remix.in.ua/ua/p1088410198-cbms-datchik-shoda.html> (дата звернення: 14.03.2026).
141. Датчики і перемикачі для виявлення сходу стрічки та вирівнювання: безпека конвеєрів 4В - КСК-Автоматизація. [Електронний ресурс]. КСК-Автоматизація. URL: <https://kck.ua/catalog/datchiki-i-peremikachi-dlya-viyavlennya-shodu-strichki-i-virivnyuvannya> (дата звернення: 14.03.2026).
142. Інструкція щодо перевезення пасажирів стрічковими конвеєрами в підземних виробках вугільних шахт. [Електронний ресурс]. Охорона праці в Україні. URL: <https://ohoronapraci.com.ua/instructions/662424-instruktsiya-shchodo-perevezennya-pasazhyriv-strichkovymy-konveyeramy-v> (дата звернення: 14.03.2026).
143. «Розробка проекту будівництва заготівельного елеватора місткістю 30. [Електронний ресурс]. ОНТУ. URL: <https://card-file.ontu.edu.ua/bitstreams/cea49ba5-b422-4c88-a1d0-53c33c097c34/download> (дата звернення: 14.03.2026).
144. Ловейкін, В. С., Кадикало, І. О., **Колєсніков, В. М.** (2025). Методи та підходи оптимізації пуску стрічкового конвеєра при транспортуванні зернових матеріалів. Збірник тез доповідей XIX Міжнародної науково-практичної конференції «Обуховські читання». с. 71–72. Київ. Україна.
145. Деталі машин: Підручник. Частина 1. [Електронний ресурс]. Луцький національний технічний університет. URL: https://e-tk.lntu.edu.ua/pluginfile.php/17191/mod_resource/content/1/%D0%94%D0%B5%D1%82%D0%B0%D0%BB%D1%96%20%D0%BC%D0%B0%D1%88%D0%B8%D0%BD%20%D0%9F%D1%96%D0%B4%D1%80%D1%83%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%BA.%D0%A7%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BD%D0%B0%201.pdf (дата звернення: 28.03.2026).

146. ДСТУ 4397:2005 Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування. [Електронний ресурс]. ТДАТУ. URL: <https://www.tsatu.edu.ua/tsst/wp-content/uploads/sites/6/dstu-4397-2005-metody-ekonomichnoho-ocinjuvannja-tehniky-na-etapi-vyprovovuvannja.pdf> (дата звернення: 28.03.2026).
147. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ до виконання індивідуальних завдань з дисциплін. [Електронний ресурс]. Дніпровський державний технічний університет. URL: <https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/1/5/1-5-mz7.pdf> (дата звернення: 28.03.2026).
148. Розробка і дослідження параметрів плавного пуску стрічкового конвеєра. [Електронний ресурс]. Донецький національний технічний університет. URL: <https://masters.donntu/2018/fkita/nesvitaylo/diss/indexu.htm> (дата звернення: 28.03.2026).
149. Використання перетворювачів частоти. Економічна ефективність та термін окупності. [Електронний ресурс]. СВ АЛЬТЕРА. URL: <https://www.svaltera.ua/press-center/articles/4343.php> (дата звернення: 28.03.2026).
150. Юридичним споживачам – Новини. [Електронний ресурс]. ТОВ "ЕНЕРА СУМИ". URL: <https://sm.enera.ua/home/article/show/325> (дата звернення: 28.03.2026).
151. Вартість 1 кВт Електроенергії для ФОП у 2025. [Електронний ресурс]. Ecotech Ukraine. URL: <https://www.ecotech.ua/vartist-1-kvt-elektroenergiyi-dlya-fop-u-2025/> (дата звернення: 28.03.2026).
152. Ціна на пшеницю в Україні – 10955 грн за тону. [Електронний ресурс]. Tripoli.land. URL: <https://tripoli.land/ua/pshenitsa-furazh> (дата звернення: 28.03.2026).
153. Конвеєр стрічковий закритого типу (ціна). [Електронний ресурс]. Завод ГО Прогрес. URL: <https://zavodgooprogress.com.ua/ua/p1545714229-konvejer-lentochnyj-zakrytogo.html> (дата звернення: 28.03.2026).

ДОДАТКИ