

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ГЕОДЕЗІЇ, ЗЕМЛЕУСТРОЮ ТА АГРОІНЖЕНЕРІЇ
КАФЕДРА АГРОІНЖЕНЕРІЇ

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
д.т.н., професор

_____ Костянтин ДЯДЮРА

« ____ » _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «першого (бакалаврського) рівня»
освітньої програми «Агроінженерія»
за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

КОНСТРУКЦІЯ ШНЕКОВОГО ПЕРЕВАНТАЖУВАЧА ЗЕРНА З ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ВІД СОНЯЧНОЇ ПАНЕЛІ

Науковий керівник: професор, д.т.н.
_____ Костянтин ДЯДЮРА

Рецензент: к.т.н.
_____ Роман АНКУДІНОВ

Виконав здобувач першого (бакалаврського)
Рівня вищої освіти заочної форми навчання
освітньо-професійної програми
«Агроінженерія»
спеціальності 208 «Агроінженерія»
Олександр ЯЦКОВ

*Засвідчую, що кваліфікаційна робота містить
результати власних досліджень. використання
ідей і текстів інших авторів має посилання на
відповідне джерело.*

_____ Олександр ЯЦКОВ

ОДЕСА – 2026

ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет геодезії, землеустрою та агроінженерії

Кафедра агроінженерії

Рівень вищої освіти другий (магістр)

Галузь знань 20 Аграрні науки та продовольство

Спеціальність 208 «Агроінженерія»

Освітня програма Агроінженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри агроінженерії

Костянтин ДЯДЮРА

«___» _____ 2026 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ

Олександр ЯЦКОВ

1. Тема кваліфікаційної роботи:

«Конструкція шнекового перевантажувача зерна з електроприводом від сонячної панелі»

науковий керівник кваліфікаційної роботи: професор, д.т.н. Дядюра Костянтин Олександрович

затверджені наказом ректора Одеського державного аграрного університету № 186 від « 05 » _____ 09 _____ 2025 р.

2. Строк подання здобувачем кваліфікаційної роботи 15 червня 2026 року.

3. **Об'єкт дослідження:** процес транспортування сипучих сільськогосподарських матеріалів мобільним гвинтовим конвеєром з автономним живленням.

4. **Предмет дослідження:** конструктивні та кінематичні параметри гвинтового робочого органу, механічні характеристики електродвигуна постійного струму та енергетичні параметри фотоелектричних панелей і буферного акумулятора.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

5.1. Теоретико-методичний розділ: виконати огляд конструкцій мобільних гвинтових конвеєрів та їхніх робочих органів (класифікація за типом гвинта, приводом, мобільністю, кутом нахилу).

5.2. Дослідницько-аналітичний розділ: визначити фізико-механічні властивості зерна як об'єкта транспортування (насипна густина, кути тертя та природного укусу, коефіцієнт заповнення); розробити математичну модель переміщення сипучого матеріалу гвинтовим робочим органом для визначення продуктивності та необхідної потужності; скласти енергетичний баланс системи

«фотоелектрична панель – MPPT-контролер – буферний акумулятор – електродвигун постійного струму».

5.3. Проектно-рекомендаційний розділ: виконати кінематичний розрахунок шнека: визначити зовнішній діаметр гвинта, діаметр вала, крок, довжину конвеєра, кут нахилу та частоту обертання; провести тяговий розрахунок та обрати потужність електродвигуна постійного струму (BLDC) та редуктор (тип, передаточне число); розрахувати площу сонячних панелей, вибрати MPPT-контролер та буферний акумулятор (LiFePO_4), визначити схему з'єднання панелей

6. Орієнтовний перелік графічного та табличного матеріалу:

6.1. До теоретико-методичного розділу: аналіз технологічних процесів перевантаження зернової маси (польові та складські умови); класифікація технологій перевантаження зерна.

6.2. До дослідницько-аналітичного розділу: математичне моделювання переміщення сипучого матеріалу; енергетичний баланс автономної системи (фотоелектрична → акумуляуюча → електромеханічна)

6.3. До проектно-рекомендаційного розділу: схема з'єднання сонячних панелей (2S2P) та підключення до MPPT-контролера та акумулятора; результати тягового розрахунку: механічна потужність на валу, електрична потужність двигуна, крутний момент на шнеці; результати перевірочних розрахунків на міцність вала шнека (напруга кручення, запас міцності)

7. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:

об'єкт транспортування: зерно пшениці (насипна густина 780 кг/м^3 , вологість 14–20%, кут тертя об сталь $22\text{--}32^\circ$); кліматичні умови: південний регіон України (Одеська область), інсоляція $5,2 \text{ кВт}\cdot\text{год/м}^2$ на добу в літній період; енергетичні параметри: напруга системи 48 В постійного струму, акумулятор LiFePO_4 ємністю $100 \text{ А}\cdot\text{год}$, сонячні панелі потужністю 180 Вт (4 шт., загальна 720 Вт).

9. Дата видачі завдання: « 27 » 09 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	Кількість кредитів	Примітка
1.	Визначення теми, об'єкта та предмета дослідження	Лютий 2026	0,25	
2.	Отримання завдання і складання змісту кваліфікаційної роботи	Лютий 2026	0,25	

3.	Складання календарного плану – графіку з підготовки кваліфікаційної роботи	Березень 2026	0,5	
4.	Написання першого розділу кваліфікаційної роботи	Березень 2026	2,0	
5.	Вивчення матеріалів базових підприємств	Квітень 2026	1,0	
6.	Написання другого розділу кваліфікаційної роботи	Квітень 2026	2,0	
7.	Написання третього розділу кваліфікаційної роботи	Травень 2026	3,0	
8.	Написання висновків, списку літератури	Травень 2026	0,5	
9.	Перевірка кваліфікаційної роботи науковим керівником	Червень 2026		
10.	Доопрацювання роботи після зауважень наукового керівника	Червень 2026	0,5	
11.	Підготовка до захисту: доповідь, ілюстративний матеріал	Червень 2026	0,5	
12.	Подання кваліфікаційної роботи на кафедру	15 червня 2026		
13.	Перевірка кваліфікаційної роботи на оригінальність	Червень 2026		
14.	Попередній захист на кафедрі	Червень 2026		
15.	Рецензування кваліфікаційної роботи	Червень 2026		
16.	Захист кваліфікаційної роботи	18-20 червня 2026	1,5	
	Загальна кількість		12	

Здобувач ОС бакалавр

Науковий керівник

Гарант ОП

_____ Олександр ЯЦКОВ

_____ Костянтин ДЯДЮРА

_____ Дмитро ДОМУЩІ

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота містить: 91 сторінок, 19 рисунків, 20 таблиць, 18 джерел за переліком посилань.

Об’єкт дослідження: процес транспортування сипучих сільськогосподарських матеріалів мобільним гвинтовим конвеєром з автономним живленням.

Мета роботи: підвищення мобільності та енергоефективності процесу перевантаження зерна шляхом розробки конструкції шнекового конвеєра, інтегрованого з автономною фотоелектричною системою живлення.

Методи дослідження: у роботі застосовано методи теоретичної механіки (для моделювання процесу переміщення сипучого середовища та розрахунку тягового опору), методи електротехніки (для визначення енергетичного балансу автономної DC-мережі), а також методи інженерного конструювання та техніко-економічного аналізу.

Отримані результати: У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання щодо забезпечення повної енергетичної автономності процесів перевантаження зернових культур. Виконано тяговий розрахунок конвеєра та обґрунтовано необхідну потужність електродвигуна постійного струму. Розраховано площу фотоелектричного масиву та ємність буферного літійового акумулятора (LiFePO₄), що гарантує надійну взаємодію технічних систем (механічної та генеруючої) і запобігає розстроюванню параметрів електропривода в умовах мінливої сонячної інсоляції.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ШНЕКОВИЙ ПЕРЕВАНТАЖУВАЧ, ЗЕРНОВА МАСА, ЕЛЕКТРОПРИВІД, СОНЯЧНА ПАНЕЛЬ, ФОТОЕЛЕКТРИЧНА СИСТЕМА, АВТОНОМНІСТЬ, ТЯГОВИЙ ОПР, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ.

					14.17 - КР.040.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РЕФЕРАТ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Яцков О.В.						
Перевір.		Дядюра К. О.					5	1
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						

ЗМІСТ

	С.
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ ІШНЕКОВИХ ПЕРЕВАНТАЖУВАЧІВ І АВТОНОМНИХ СИСТЕМ ЖИВЛЕННЯ.....	12
1.1. Аналіз технологічних процесів перевантаження зернової маси в польових та складських умовах.....	12
1.2. Огляд конструкцій мобільних гвинтових конвеєрів та їхніх робочих органів.	20
1.3. Перспективи використання агрівольтаїки та автономних фотоелектричних систем у сільськогосподарських машинах.	29
Висновки.....	36
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ІШНЕКОВОГО ПЕРЕВАНТАЖУВАЧА З СОНЯЧНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ.....	37
2.1 Фізико-механічні властивості зерна як об'єкта транспортування.....	37
2.2 Математичне моделювання процесу переміщення сипучого матеріалу гвинтовим робочим органом.....	41
2.3 Енергетичний баланс: взаємодія технічних систем (фотоелектричної, акумуляуючої та електромеханічної).....	45
2.4 Теоретичне обґрунтування режимів роботи сонячної панелі для запобігання розстроювання параметрів електропривода.....	48
Висновки.....	51
РОЗДІЛ 3. ПРОЄКТУВАННЯ ТА ІНЖЕНЕРНИЙ РОЗРАХУНОК КОМПОНЕНТІВ МАШИНИ.....	53

					14.17 - КР.040.0.000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.	Яцков О.В.				ЗМІСТ		Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевір.	Дядюра К.О.							6	2
Реценз.									
Н. Контр.									
Затверд.	Дядюра К. О.								

3.1 Кінематичний розрахунок та визначення геометричних параметрів шнека.....	53
3.2 Тяговий розрахунок та вибір потужності електродвигуна постійного струму.....	53
3.3 Розрахунок площі сонячних панелей, вибір MPPT-контролера та буферного акумулятора.....	58
3.4 Розробка 3D-моделі та загальної компоновки мобільного перевантажувача.	61
Висновки.....	65
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ	66
4.1 Аналіз небезпечних факторів під час експлуатації мобільних шнекових конвеєрів.	66
4.2 Електробезпека під час роботи з фотоелектричними панелями та акумуляторними батареями (DC-мережі)	69
4.3 Розрахунок стійкості конструкції від перекидання під вітровим навантаженням.....	72
Висновки.....	76
РОЗДІЛ 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ	77
5.1 Капітальні витрати на виготовлення та комплектацію машини.....	77
5.2 Розрахунок економії паливно-мастильних матеріалів та електроенергії з мережі.....	79
5.3 Визначення терміну окупності проєкту.....	82
Висновки.....	86
ВИСНОВКИ.....	87
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	90

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку агропромислового комплексу України характеризується жорсткими вимогами до енергетичної безпеки, ресурсозбереження та мобільності технологічних процесів. Традиційна логістика зернових культур на токах, у складських приміщеннях підлогового типу та безпосередньо в польових умовах під час збиральної кампанії супроводжується значними обсягами вантажно-розвантажувальних робіт. Основним технічним засобом для виконання цих операцій є мобільні гвинтові конвеєри (шнекові перевантажувачі). Проте більшість існуючих засобів механізації потребують або підключення до стаціонарних електричних мереж трифазного змінного струму, що обмежує їх використання на віддалених майданчиках, або привода від вала відбору потужності (ВВП) трактора, що призводить до перевитрати дорогого дизельного пального, акумуляції шкідливих викидів та нераціонального використання потужних енергозасобів на малонавантажених операціях.

Враховуючи високий рівень сонячної інсоляції південних регіонів України, зокрема Одеської області, перспективним вектором модернізації сільськогосподарської техніки є впровадження автономних фотоелектричних систем живлення. Інтеграція сонячних панелей безпосередньо в конструкцію мобільного шнекового перевантажувача дозволяє створити повністю енергонезалежний технологічний комплекс.

Проте функціонування таких агрегатів супроводжується динамічною зміною зовнішніх факторів: коливанням інтенсивності сонячного випромінювання, хмарністю, затиненням деревними чи конструкційними елементами, а також змінним фізико-механічним опором зернової маси під час пуску та безпосередньої роботи гвинта.

					14.17 - КР. 040.0.000 ПЗ								
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата									
Розроб.		Яцков О.В.			ВСТУП			Літ.		Аркуш		Аркушів	
Перевір.		Дядюра К. О.								8		4	
Реценз.													
Н. Контр.													
Затверд.		Дядюра К. О.											

Стабільність та надійність реалізації цього процесу визначає складна взаємодія технічних систем – фотоелектричного генератора, інтелектуального МРРТ-контролера, буферного літій-залізо-фосфатного акумулятора та електромеханічного привода постійного струму. Неузгодженість їхніх параметрів за умов пікових навантажень або зниження інсоляції призводить до критичного розстроювання робочих режимів електропривода, падіння крутного моменту на валу шнека та виникнення аварійних режимів роботи. Це обумовлює необхідність проведення ґрунтовних інженерно-конструкторських розрахунків та теоретичного обґрунтування параметрів усіх компонентів енергетичного ланцюга. Таким чином, розробка конструкції мобільного шнекового перевантажувача зерна з автономним електроприводом від сонячної панелі є актуальним науково-прикладним завданням для сучасної агроінженерної науки.

Мета дослідження – підвищення автономності, мобільності та енергоефективності процесу перевантаження зернової маси шляхом обґрунтування конструктивно-кінематичних параметрів шнекового конвеєра та оптимізації характеристик інтегрованої фотоелектричної системи привода постійного струму.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати існуючі конструкції мобільних гвинтових конвеєрів та досвід застосування відновлюваних джерел енергії в мобільних сільськогосподарських агрегатах.

2. Розробити математичну модель переміщення зерна гвинтовим робочим органом для визначення динамічних опорів та необхідної потужності привода в різних режимах роботи.

3. Обґрунтувати параметри взаємодії технічних систем фотоелектричного масиву та буферного накопичувача для запобігання розстроювання електричних режимів привода під час зміни сонячної активності.

4. Виконати конструкторський розрахунок елементів шнекового перевантажувача, підібрати раціональну компонентну базу системи автономного живлення та розробити тривимірну модель агрегату.

					14.17 - КР. 040.0.000 ПЗ	Аркуш
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. Здійснити розрахунок стійкості мобільної конструкції проти перекидання під дією вітрового навантаження з урахуванням площі фотоелектричних панелей та розробити заходи з охорони праці.

6. Визначити техніко-економічні показники впровадження розробленого перевантажувача та термін окупності капітальних інвестицій.

Об'єкт дослідження — процес транспортування зернової маси мобільним гвинтовим конвеєром з автономним живленням від інтегрованої фотоелектричної системи.

Предмет дослідження — конструктивні та кінематичні параметри гвинтового робочого органу, механічні характеристики електродвигуна постійного струму та енергетичні параметри фотоелектричних панелей і буферного акумулятора.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження базуються на основних законах класичної механіки сипучих середовищ (для визначення тягового опору та продуктивності шнека), законах теоретичної електротехніки та напівпровідникової електроніки (для моделювання балансу енергії в DC-мережі), методах аеродинаміки (для аналізу вітрового навантаження та стійкості рами). Проектування та графічне відображення конструкції виконано за допомогою сучасних CAD-систем автоматизованого проектування. Економічна оцінка базується на стандартних методиках визначення ефективності інвестиційних проєктів та ресурсозбереження в АПК.

Наукова новизна отриманих результатів (для магістерського рівня / розширеного бакалаврського проєкту):

– Вперше отримано математичні залежності, що описують динамічну взаємодію технічних систем автономного сонячного привода та механічного навантаження шнека, які враховують нелінійний характер генерації струму фотопанелями при варіюванні інсоляції та запобігають розстроюванню параметрів крутного моменту двигуна.

– Удосконалено методику розрахунку стійкості мобільних сільськогосподарських конвеєрів, що, на відміну від існуючих, враховує

					14.17 - КР. 040.0.000 ПЗ	Аркуш
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

додаткову парусність фотоелектричного масиву та динаміку зміщення центру мас при зміні кута нахилу шнека.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблена конструкція та пакет інженерних розрахунків дозволяють створити дієздатний зразок мобільного автономного перевантажувача зерна продуктивністю до 15–20 т/год, який не потребує підключення до ліній електропередач або залучення трактора як джерела механічної енергії. Результати роботи можуть бути безпосередньо впроваджені на підприємствах агроснабження, у фермерських господарствах Півдня України під час модернізації токового обладнання, а також використані як методична база для подальшого проєктування автономних сільськогосподарських машин малої потужності.

					14.17 - КР. 040.0.000 ПЗ	Аркуш
						11
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ ШНЕКОВИХ ПЕРЕВАНТАЖУВАЧІВ І АВТОНОМНИХ СИСТЕМ ЖИВЛЕННЯ

1.1 Аналіз технологічних процесів перевантаження зернової маси в польових та складських умовах

Перевантаження зернової маси є одним з найбільш відповідальних технологічних процесів у системі післязбиральної обробки та логістики зерна (рисунок 1.1). Від якості його організації залежать не лише темпи збиральних робіт, але й кінцева якість зерна, рівень втрат та економічна ефективність усього виробничого циклу. Тому розуміння суті технологічних ланцюгів перевантаження у різних умовах є базовою передумовою для подальшого проектування раціональних технічних засобів [1, 2].



Рисунок 1.1 – Аналіз технологічних процесів перевантаження зернової маси: польові та складські умови

					14.17 - КР.040.1.000 ПЗ							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Яцков О.В.			РОЗДІЛ 1				Літ.		Аркуш	Аркушів
Перевір.		Дядюра К. О.									12	20
Реценз.												
Н. Контр.												
Затверд.		Дядюра К. О.										

Загальна характеристика технологічних ланцюгів перевантаження зерна.

Сутність процесу перевантаження полягає у механічному переміщенні зернової маси з одного транспортного засобу, ємності або насипу в інший за допомогою спеціалізованих технічних засобів. Залежно від місця виконання операцій, перевантаження поділяють на дві принципово відмінні групи: польове перевантаження (безпосередньо в полі під час збирання врожаю) та складське перевантаження (на токах, зерноскладах, елеваторах) (рисунок 1.2).

Сучасна класифікація технологій перевантаження зерна (за способом переміщення)

Тип технології	Принцип дії	Типові засоби	Переваги	Недоліки
 Гвинтовий (шнековий)	Переміщення сипучого матеріалу обертливим гвинтом усередині кожуха	Шнекові навантажувачі, пересувні шнеки, стаціонарні шнекові транспортери	Простота конструкції, герметичність, здатність працювати під кутом до 45°, низьке травмування зерна	Відносно висока енергоємність, чутливість до абразивного зносу, обмежена довжина (до 12-15 м)
 Стрічковий	Переміщення сипучого матеріалу суцільною стрічкою	Стрічкові конвеєри, естаціонарні транспортери	Висока продуктивність, низькі енерговитрати, велика довжина траси	Велика металомісткість, складність роботи під кутом, відкритість (пилоутворення)
 Пневматичний	Переміщення сипучого матеріалу потоком повітря	Зернові пневмонавантажувачі (ПЗМ, ЗПС)	Висока мобільність, можливість подачі на велику висоту, герметичність	Найвищі енерговитрати, значне травмування зерна, пилоутворення на виході
 Норійний (ковшовий)	Вертикальне переміщення ковшами	Стаціонарні норії для елеваторів	Дуже висока пропускна здатність (до 200 т/год), надійність	Виключно стаціонарне застосування, велика висота

Рисунок 1.2 – Сучасна класифікація технологій перевантаження зерна

Принципова відмінність між ними полягає у факторі часу та мобільності. Польове перевантаження має бути максимально швидким, оскільки комбайни не можуть простоювати в очікуванні розвантаження бункера (таблиця 1.1). Складське перевантаження, навпаки, часто допускає більш тривалі операції, але вимагає високої пропускної здатності для обробки великих партій [3, 4].

Таблиця 1.1 – Сучасна класифікація технологій перевантаження зерна (за способом переміщення).

Тип технології	Принцип дії	Типові засоби	Переваги	Недоліки
Гвинтовий (шнековий)	Переміщення сипучого матеріалу обертливим гвинтом усередині кожуха	Шнекові навантажувачі, пересувні шнеки, стаціонарні шнекові транспортери	Простота конструкції, герметичність, здатність працювати під кутом до 45°, низьке травмування зерна	Відносно висока енергоємність, чутливість до абразивного зносу, обмежена довжина (до 12-15 м)
Стрічковий	Переміщення сипучого матеріалу суцільною стрічкою	Стрічкові конвеєри, стаціонарні транспортери	Висока продуктивність, низькі енерговитрати, велика довжина траси	Велика металомісткість, складність роботи під кутом, відкритість (пилоутворення)
Пневматичний	Переміщення сипучого матеріалу потоком повітря	Зернові пневмонавантажувачі (ПЗМ, ЗПС)	Висока мобільність, можливість подачі на велику висоту, герметичність	Найвищі енерговитрати, значне травмування зерна, пилоутворення на виході
Норійний (ковшовий)	Вертикальне переміщення ковшами	Стаціонарні норії для елеваторів	Дуже висока пропускна здатність (до 200 т/год), надійність	Виключно стаціонарне застосування, велика висота

Для мобільного застосування в польових умовах та на невеликих складах найбільшого поширення набули гвинтові (шнекові) перевантажувачі з їх різновидами – пересувними шнеками на колесах з електроприводами (або з приводом від ВВП трактора) та мобільними завальними пристроями, а також відносно новим класом машин – бункерами-перевантажувачами, які

					14.17 - КР.040.1.000 ПЗ	Аркуш
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

забезпечують одночасне накопичення та перевантаження зерна з мінімальними втратами [2, 5, 6].

Одним з різновидів мобільних шнекових машин, призначених для роботи з буртами та насипами зерна, є пересувні шнеки продуктивністю до 30 т/год. У поточних умовах ведення сільського господарства, коли обсяги виробництва зерна окремими господарствами можуть сягати кількох тисяч тонн на рік, а строки збирання є стиснутими через кліматичні фактори, одним з найбільш гострих питань стає організація безперебійного перевантаження зерна в польових умовах безпосередньо під час роботи зернозбиральних комбайнів, особливо при використанні важкої високопродуктивної техніки на великих площах [7].

Організація польового перевантаження зерна.

Польове перевантаження зерна виконується безпосередньо в полі під час збирання врожаю. Зернозбиральний комбайн — складна машина, що виконує послідовно і безперервно зрізання хліба, обмолот, сепарацію та очищення зерна. Коли бункер комбайна заповнюється (сучасні комбайни мають бункери ємністю 6–12 тонн), виникає потреба в його розвантаженні.

Існують дві основні схеми організації польового перевантаження (рисунок 1.3) [8]:

1. Пряма схема (навантаження в транспорт). Комбайн розвантажує зерно безпосередньо в автомобіль або тракторний причіп, який рухається поруч. Перевага: мінімальна кількість операцій, низькі втрати часу. Недолік: потрібен додатковий транспорт, який не завжди може маневрувати біля комбайна на перезволожених або нерівних полях.

2. Двоступенева схема (використання бункера-перевантажувача). Комбайн розвантажує зерно в пересувний бункер-перевантажувач (ємністю 20–50 м³), який потім (після заповнення) перевантажує накопичене зерно в стаціонарний транспорт. Така схема зменшує простої комбайна до мінімуму: зерно вивантажується швидко, на ходу, без зупинки комбайна. Крім того, бункер-

					14.17 - КР.040.1.000 ПЗ	Аркуш
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перевантажувач може бути обладнаний власною системою зважування, що дозволяє точно контролювати обсяги зібраного зерна [9].

ОРГАНІЗАЦІЯ ПОЛЬОВОГО ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ ЗЕРНА



Рисунок 1.3 – Організація польового перевантаження зерна

Втрати зерна в польових умовах. Під час збирання та перевантаження в полі виникають *дві основні категорії втрат зерна* [10]:

- Втрати біологічні (осипання через затримку збирання, втрати від шкідників), які можуть сягати 0,5–1,5% від урожаю при недотриманні оптимальних строків.

- Втрати механічні (травмування зерна під час транспортування та перевантаження). Дослідженнями встановлено, що величина механічного травмування зерна в різних типах перевантажувальних машин залежить від конструктивних параметрів та режимів роботи, зокрема – частоти обертання робочих органів та наявності амортизуючих елементів. Найбільші механічні пошкодження виникають при пневматичному транспортуванні; шнекове транспортування забезпечує помірно травмування зерна, що є однією з його переваг [11].

Організація перевантаження зерна в складських умовах (рисунок 1.4).

Складське перевантаження зерна здійснюється на виробничих майданчиках господарств — токах, зерноскладах, елеваторах — після завершення польових робіт або в процесі відвантаження зерна споживачам. До цієї категорії належать операції [12]:

- Завантаження зерна з буртів та насипів у транспортні засоби для відправки на переробні підприємства (млини, комбикормові заводи);
- Переміщення зерна всередині складу (з однієї секції до іншої, на сушку, очищення тощо);
- Формування насипів зерна для тривалого зберігання;
- Завантаження зерна в сушильне обладнання (зерносушарки).

Для складського перевантаження використовують як стаціонарні, так і мобільні засоби. Вибір залежить від обсягів робіт, частоти операцій та наявної інфраструктури [13].

Стаціонарні системи (на базі стрічкових конвеєрів, норей з ковшами) характеризуються високою пропускною здатністю, але потребують значних капітальних витрат і прив'язані до конкретної точки. Мобільні перевантажувачі (найчастіше — шнекові) дозволяють виконувати роботи в різних місцях складу та експлуатуються переважно в господарствах з помірними обсягами виробництва [14].



Рисунок 1.4 – Організація перевантаження зерна в складських умовах

					14.17 - КР.040.1.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Шнекові перевантажувачі як основний засіб мобільного транспортування зерна

Серед усіх типів мобільного перевантажувального обладнання, доступного для господарств невеликого та середнього масштабу, шнекові перевантажувачі займають домінуюче положення завдяки поєднанню таких якостей [15]:

- відносна простота конструкції та обслуговування;
- герметичність процесу (відсутнє пилоутворення);
- здатність працювати під кутом до горизонту (до 30–45°);
- помірне травмування зерна порівняно з пневматичними системами;
- можливість швидкого переміщення між різними об'єктами робіт.

З іншого боку, шнекові перевантажувачі мають певні обмеження, які необхідно враховувати при їх проєктуванні та застосуванні:

- порівняно висока енергоємність (потужність двигуна може сягати 4–15 кВт залежно від продуктивності та довжини);
- обмежена максимальна довжина (зазвичай до 12 м) через втрати на тертя та крутильні коливання вала;
- чутливість до перевантажень (перевантаження понад номінальну продуктивність спричиняє заклинювання та зупинку);
- абразивний знос робочих органів (гвинта та кожуха) при транспортуванні зерна з підвищеним вмістом ґрунтових домішок.

Важливо зазначити: енергоємність шнекових перевантажувачів є однією з ключових проблем, що обмежує їх ефективність, особливо в умовах підвищення тарифів на електроенергію в Україні. Тому для малопотужних господарств (2–5 тис. т зерна на рік) пошук шляхів здешевлення енергопостачання шнекових навантажувачів є актуальним завданням, що й обумовлює доцільність переходу на альтернативні джерела живлення, зокрема – фотоелектричні системи [16].

Характеристики типових шнекових перевантажувачів, наявних на ринку України

					14.17 - КР.040.1.000 ПЗ	Аркуш
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

На ринку України представлений широкий асортимент шнекових перевантажувачів зерна різних виробників – як вітчизняних (Agro Build, Технік, Кобзаренко), так і закордонних (виробництва КНР, Туреччини та ЄС) (таблиця 1.2).

Таблиця 1.2 – Порівняльна характеристика типових шнекових перевантажувачів зерна

Параметр	Шнек серії «Стандарт»	Шнек пересувний 159 мм	Шнек на 7 м (двигун 4 кВт)	Пересувний шнек до 30 т/год
Діаметр, мм	159	159	133	200
Довжина, м	4–8 (на замовлення)	6–10 (на замовлення)	7	10
Продуктивність, т/год	15–25	25	до 20	до 30
Тип привода	Електродвигун 380 В	Електродвигун 380 В або ВВП трактора	Електродвигун 4 кВт, 380 В	Електродвигун або бензиновий/дизельний двигун
Ціна (орієнтовно), тис. грн	22–28 (довжина 4 м)	25–35	≈ 24,75	35–50
Основне застосування	Завантаження транспортних засобів з бункерів	Завантаження зерна з буртів	Переміщення зерна між складським і приміщеннями	Робота з буртами продуктивністю до 30 т/год

При використанні таких перевантажувачів у господарствах постають гострі проблеми, пов'язані насамперед з енергетичною залежністю: значна частина моделей розрахована на роботу від трифазної мережі 380 В (4–15 кВт), до якої не завжди є доступ на віддалених токах або в полі (під час польового перевантаження комбайнів). Крім того, варіанти з бензиновими/дизельними двигунами призводять до значних витрат палива (8–12 л/год) та створюють додаткове шумове й вібраційне навантаження на оператора [12].

Саме тому ідея переходу на живлення шнекових перевантажувачів від автономних сонячних електростанцій з акумуляторними батареями є надзвичайно актуальною: за наявності виробництва «зеленої» електроенергії зменшуються витрати та підвищується мобільність обладнання [11].

Нормативна база втрат зерна при перевантаженні

Важливим аспектом, що визначає вибір технології та технічних засобів для перевантаження зерна, є нормативні втрати продукції. Згідно з чинними нормативними документами України, встановлено наступні величини:

- *Норма механічних втрат зерна* при завантаженні та розвантаженні механізованим способом у зерноскладах – 0,044 %, в елеваторах – 0,03 %.
- *Норма природних втрат* при перевезенні зерна насипом незалежно від відстані – 0,07 %, у тарі – 0,05 %.

При цьому загальні втрати зерна при транспортуванні та перевантаженні можуть значно перевищувати нормативні величини, якщо порушуються технологічні регламенти роботи обладнання, використовуються несправні машини, або зерно має підвищену вологість ($> 16 \%$) та значну засміченість ($> 5 \%$) [1, 11].

1.2 Огляд конструкцій мобільних гвинтових конвеєрів та їхніх робочих органів

Гвинтовий (шнековий) конвеєр є одним із найефективніших та найпоширеніших технічних засобів для транспортування сипких матеріалів, зокрема зерна. Його конструкція базується на принципі архімедового гвинта – обертова гвинтова поверхня переміщує матеріал уздовж закритого кожуха або відкритого жолоба. Завдяки простоті конструкції, герметичності та здатності працювати під різними кутами нахилу гвинтові конвеєри набули широкого застосування як у стаціонарних, так і в мобільних варіантах виконання [10, 18].

					14.17 - КР.040.1.000 ПЗ	Аркуш
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ОГЛЯД КОНСТРУКЦІЙ МОБІЛЬНИХ ГВИНТОВИХ КОНВЕЄРІВ ТА ЇХНІХ РОБОЧИХ ОРГАНІВ



Рисунок 1.5 – Конструкція мобільного гвинтового конвеєра та його робочих органів

Принцип роботи та загальна будова мобільних гвинтових конвеєрів

Мобільний шнековий конвеєр (пересувний шнек, «шнек з бурта») – це конструкція, призначена для завантаження або перевантаження сипучих матеріалів з буртів, насипів, транспортних засобів, а також для формування буртів на відкритих майданчиках та у складських приміщеннях.

Основні вузли та компоненти [4]:

Принципова схема пересувного шнекового навантажувача включає наступні основні елементи:

1. Приймальний бункер (завантажувальна ліяка) – розташований у нижній частині конвеєра. Забезпечує захоплення сипучого матеріалу з бурта або насипу; конструктивно може бути виконаний у вигляді сітки, бункера або спеціального підбирача залежно від умов роботи. У деяких моделях передбачено знімний підбирач, що розширює функціональність машини.

2. Гвинтовий робочий орган (власне шнек) — центральний елемент, що складається з вала та закріпленої на ньому гвинтової поверхні (спіралі). Обертаючись, спіраль штовхає зерно вздовж осі конвеєра.

Залежно від конструкції спіраль може бути цільновитою, секційною або зварною.

3. Напрямний кожух (транспортна труба) — циліндрична сталева труба, всередині якої обертається шнек. Забезпечує герметичність процесу та запобігає розсипанню матеріалу. Діаметр труби є основним типорозміром шнека (зазвичай 133 мм, 159 мм, 200 мм, 260 мм тощо). Матеріал труби та витків мають високу зносостійкість.

4. Приводний механізм — включає електродвигун (для варіантів від мережі або сонячних панелей), редуктор або пасову передачу. Привід забезпечує обертання гвинта з розрахунковою частотою. В окремих конструкціях передбачено запобіжну муфту для захисту від перевантажень.

5. Ходова частина (рама на колесах) — забезпечує мобільність конструкції. Мобільні шнеки встановлюються на пневматичні колеса, що дозволяє легко транспортувати їх трактором або вручну в межах господарства. Низка моделей мають посилену ходову частину для роботи в складних польових умовах.

6. Механізм регулювання кута нахилу — забезпечує зміну висоти вивантаження та адаптацію до різних типів транспортних засобів або складських ємностей.

7. Вивантажувальний патрубок — розташований у верхній частині конвеєра, спрямовує потік зерна в приймальний бункер транспортного засобу, сушарки чи іншого обладнання.

8. Система безпеки — включає аварійну кнопку зупинки, запобіжний вимикач при складанні (для складних моделей) та захисні кожухи обертових частин.

Принцип дії: Електродвигун через редуктор (або пасову передачу) обертає гвинтовий вал. Завантажувальний матеріал надходить у приймальний бункер, захоплюється обертовою спіраллю та переміщується вздовж осі конвеєра. Завдяки тертю об стінки кожуха та взаємодії з витками шнека зерно піднімається

					14.17 - КР.040.1.000 ПЗ	Аркуш
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вгору (при похилому положенні) або транспортується горизонтально, після чого вивантажується через верхній патрубок.

Важливою перевагою конструкції є те, що гвинт є єдиним рухомим елементом, який контактує з зерном, що спрощує обслуговування та підвищує надійність.

Класифікація мобільних гвинтових конвеєрів

Існуючі мобільні гвинтові конвеєри можна класифікувати за низкою технічних параметрів (рисунок 1.6):

а) За типом гвинтового робочого органу:

- Суцільні шнеки — традиційна конструкція із суцільною гвинтовою стрічкою, навареною на вал. Найпоширеніший тип для транспортування зерна.
- Стрічкові (гвинтові) шнеки — використовуються для в'язких або абразивних матеріалів.
- Шнеки зі змінним кроком — застосовуються для регулювання швидкості подачі матеріалу по довжині конвеєра.
- Безосьові шнеки — створені для транспортування вологих, клейких та абразивних матеріалів; вони ефективно справляються з переміщенням піску, зерна з підвищеною вологістю та інших складних середовищ.

б) За типом приводу:

- З електродвигуном (найпоширеніший варіант, живлення від мережі 380 В). Потужність двигуна залежить від діаметра та довжини шнека і варіюється від 2,2 кВт до 37 кВт.
- З приводом від валка відбору потужності (ВВП) трактора. Такі шнеки широко застосовуються в польових умовах, де відсутня стаціонарна електрична мережа. Частота обертання таких шнеків зазвичай становить 450-600 об/хв.
- З двигуном внутрішнього згоряння (бензиновим або дизельним) — для повної автономії, але з більшими експлуатаційними витратами.
- Гібридні (комбіновані) варіанти: деякі сучасні моделі (наприклад, розробки канадської компанії WESTFIELD) пропонуються з можливістю підключення як до ВВП трактора, так і до електричного двигуна.

					14.17 - КР.040.1.000 ПЗ	Аркуш
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.6 – Класифікація мобільних гвинтових конвеєрів

в) *За кількістю гвинтових ліній:*

- Одногвинтові — класична конструкція, найбільш поширена.
- Двогвинтові — використовуються для підвищення продуктивності або для спеціальних типів матеріалів.

г) *За типом виконання (мобільність) [9]:*

- Пересувні на колесах (основна категорія, що розглядається в роботі) — оснащені пневматичними колесами, можуть транспортуватися трактором та легко переміщуватися в межах складу або поля.
- Стационарні — жорстко закріплені на фундаменті, використовуються на великих елеваторах.
- Напівмобільні — мають обмежену можливість переміщення (наприклад, пересування в межах однієї виробничої ділянки).

д) *За кутом нахилу (можливістю зміни вивантаження):*

- Шнеки з ручним регулюванням кута — найпростіша конструкція, кут змінюється за допомогою гвинтового домкрата або лебідки.

– Шнеки з гідравлічним регулюванням — більш зручні, дозволяють оперативно змінювати висоту вивантаження без зупинки процесу (наприклад, у моделях POFER та WESTFIELD).

е) За кількістю секцій (можливістю складання):

– Цільні нерозбірні — більш жорстка конструкція, але громіздка при транспортуванні.

– Складні (шарнірні) — мають з'єднання, що дозволяє складати шнек навпіл або втричі для зручності транспортування та зберігання.

Робочі органи гвинтових конвеєрів: конструктивні особливості та параметри

Гвинтовий робочий орган (власне шнек) є найбільш відповідальним елементом конструкції, оскільки безпосередньо взаємодіє з зерною масою та визначає продуктивність і енергоефективність усієї машини (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Робочі органи гвинтових конвеєрів: конструктивні особливості та параметри

Огляд провідних виробників мобільних гвинтових конвеєрів.

Світовий ринок мобільних шнекових перевантажувачів представлений багатьма виробниками. Основні з них — канадські, американські, німецькі, італійські та українські компанії (рисунок 1.8).



Рисунок 1.8 – Огляд ринку мобільних гвинтових конвеєрів.

Порівняльна характеристика мобільних гвинтових конвеєрів

Для наочності нижче наведено порівняльну таблицю основних технічних параметрів типових мобільних шнекових перевантажувачів, доступних на ринку України (таблиця 1.3).

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики мобільних гвинтових конвеєрів

Параметр	«Технік» ШПЗ-30	POFER SG (D200)	WESTFIELD D (типова)	CanAGRO	Шнек з двигуном 4 кВт
Діаметр, мм	200	200	152–610	150–250	133
Довжина, м	за замовлення м	10–12	0,9–38,1	до 15	7
Продуктивність, т/год	до 30	до 42	10–625	до 100	до 20
Тип привода	електродвигун 380 В	електродвигун 380 В	ВВП/електро/бензин	електродвигун	електродвигун 380 В
Потужність двигуна, кВт	2,2	4,0–7,5	залежить від моделі	залежить від моделі	4,0

Параметр	«Технік» ШПЗ-30	POFER SG (D200)	WESTFIEL D (типова)	CanAGRO	Шнек з двигуно м 4 кВт
Частота обертання, об/хв	н/д	н/д	300–600	≤450	н/д
Особливос ті	низьке енергоспож ивання, маневреніст ь	складний, гальваніз ована сталь, лебідка, пневмоко леса	найбільший асортимент, понад 80 моделей	знижені оберти, щадне транспорту вання, посилена ходова	ремінний привід, мобільна підставка на колесах
Цільове застосуван ня	робота з буртами, насипами	завантаж ення силосів	будь-які операції з зерном	робота на елеваторах, зерносуши льних комплексах	переміще ння зерна між складськ ими приміщен нями
Орієнтовн а вартість, тис. грн	35–50	за імпортни м курсом	за імпортним курсом	за імпортним курсом	≈ 24,8

При виборі конкретної моделі для господарства необхідно враховувати:

– *Обсяг робіт*: для господарств з невеликим щорічним оборотом зерна (до 2-3 тис. т) достатньо шнека діаметром 133-159 мм з двигуном 4 кВт. Для середніх господарств (3-10 тис. т) доцільно обирати шнеки діаметром 200 мм з продуктивністю 30-50 т/год.

– *Умови експлуатації*: наявність (або відсутність) стаціонарної трифазної мережі 380 В безпосередньо визначає вибір типу привода. У польових умовах більш доцільні шнеки з приводом від ВВП трактора або від автономного ДВЗ, однак у випадку живлення від сонячних панелей і акумуляторів пріоритет мають шнеки з електродвигуном постійного струму.

– *Тип зерна*: кукурудза та соняшник мають більший абразивний вплив на робочі органи, тому для них потрібні шнеки з посиленими витками із зносостійкої сталі.

					14.17 - КР.040.1.000 ПЗ	Аркуш
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сучасні тенденції в конструюванні гвинтових робочих органів

Аналіз наукових публікацій та патентних матеріалів останніх років дозволяє виявити кілька актуальних тенденцій у розвитку конструкцій гвинтових конвеєрів для зерна:

1. Зниження пошкоджуваності зерна. Розробляються конструкції гвинтових робочих органів з еластичними змінними поверхнями. Використання еластичних матеріалів (поліуретан, спеціальні гуми) для витків шнека дозволяє суттєво зменшити механічне травмування зерна при транспортуванні, що особливо важливо для насіннєвого матеріалу.

2. Оптимізація частоти обертання. Дослідженнями встановлено, що зниження частоти обертання з 550-600 об/хв до 400-450 об/хв дозволяє зменшити пошкодження зерна на 20-35% при практично незмінній продуктивності (за рахунок збільшення діаметра або кількості заходів).

3. Застосування зносостійких матеріалів. Сучасні шнеки виготовляються з використанням високоміцних зносостійких сталей (наприклад, Hardox), а також з покриттями (напилення карбиду вольфраму, хромування) для підвищення ресурсу роботи в абразивних середовищах.

4. Розробка високошвидкісних малогабаритних конструкцій. Ведуться дослідження щодо створення компактних шнекових конвеєрів з підвищеною частотою обертання (1000-1500 об/хв) при зменшеному діаметрі, що дозволяє суттєво зменшити габарити та масу пристрою при збереженні продуктивності. Такі рішення є перспективними для мобільних машин, проте потребують вирішення проблеми травмування зерна.

5. Використання гвинтових робочих органів зі змінним кроком. Застосування шнеків, у яких крок гвинтової лінії збільшується від завантажувального до вивантажувального кінця, дозволяє покращити умови заповнення міжвиткового простору та підвищити ефективність транспортування, особливо при роботі під кутом.

					14.17 - КР.040.1.000 ПЗ	Аркуш
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6. Гібридні приводи та енергоефективність. Актуальним напрямком є розробка шнеків з рекуперацією енергії, а також інтеграція з фотоелектричними системами для автономного живлення від сонячних панелей, що особливо цінно для віддалених сільськогосподарських об'єктів без доступу до мережі.

Мобільні гвинтові конвеєри є найбільш поширеними засобами для перевантаження зерна в господарствах середньої та малої потужності завдяки простоті конструкції, герметичності, можливості роботи під кутом та відносно низькій вартості. Основними конструктивними елементами є завантажувальний бункер, гвинтовий робочий орган, транспортний кожух, привод, ходова частина та механізм регулювання кута нахилу. Діаметр шнека, крок гвинта та частота обертання визначають продуктивність та енергоспоживання. Світовий ринок пропонує широкий асортимент мобільних шнеків (продуктивністю від 10 до 625 т/год, довжиною до 38 м). Провідні виробники — WESTFIELD (Канада), CanAGRO (Німеччина), POFER (Італія), а також українські «Технік», Agro Build, «Кобзаренко». Сучасні тенденції розвитку гвинтових конвеєрів включають: зниження частоти обертання для зменшення пошкодження зерна; застосування зносостійких матеріалів (високоміцні сталі, поліуретан, спеціальні покриття); розробку малогабаритних високошвидкісних конструкцій; пошук альтернативних джерел живлення, зокрема інтеграцію з фотоелектричними системами.

Проведений аналіз конструкцій та технічних характеристик дозволяє обґрунтовано підійти до вибору параметрів шнека для подальшого проектування автономного перевантажувача з електроприводом від сонячної панелі.

1.3 Перспективи використання агровольтаїки та автономних фотоелектричних систем у сільськогосподарських машинах

Інтеграція відновлюваних джерел енергії в сільськогосподарське виробництво є одним із найбільш динамічних напрямків розвитку сучасної агроінженерії. Особливе місце серед них посідає агровольтаїка — концепція

					14.17 - КР.040.1.000 ПЗ	Аркуш
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

подвійного використання земельних ресурсів, яка дозволяє одночасно вирощувати сільськогосподарські культури та генерувати електроенергію за допомогою фотоелектричних панелей. Для мобільних сільськогосподарських машин, зокрема шнекових перевантажувачів зерна, застосування автономних сонячних систем живлення відкриває нові можливості щодо підвищення мобільності, зниження експлуатаційних витрат та забезпечення енергетичної незалежності.

Агровольтаїка як концепція подвійного використання земель

Агровольтаїка – це форма сталого землекористування, яка дозволяє одночасне ведення сільського господарства та виробництво електроенергії з встановлення фотоелектричних панелей або інших відновлюваних енергетичних систем без втрати основної функції земель як сільськогосподарських. Ключовою перевагою такого підходу є те, що сонячні панелі не займають додаткової площі — під ними можуть рости овочі, ягоди, зелень або випасатися худоба, що дозволяє максимально ефективно використовувати ресурси та створювати двофункціональні простори для вирощування продукції та генерації чистої енергії.

Ключові соціально-економічні аспекти агровольтаїки включають створення нових робочих місць та розвиток місцевої інфраструктури, залучення інвестицій у регіони через «зелені» технології, зменшення міграції до міст та покращення якості життя у місцевих громадах. Для аграрного сектору вона забезпечує власну енергію, що знижує витрати фермерів та забезпечує стабільність виробництва, мінімізує втрати врожаю завдяки енергозабезпеченню для зберігання й переробки, а також створює повний ланцюг доданої вартості: від вирощування до зберігання та переробки продукції за допомогою відновлюваної енергії.

З точки зору енергетичної безпеки, агровольтаїка знижує навантаження на національну мережу та ризики аварій, а також забезпечує автономне живлення у разі пошкодження енергомережі, що є критично важливим для сільських регіонів. Крім того, зміни клімату призводять до більш екстремальних погодних

					14.17 - КР.040.1.000 ПЗ	Аркуш
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

умов — частих посух, граду, спеки, тому захисна функція панелей (затінення рослин) набуває особливого значення.

Світові тенденції розвитку агровольтаїки: У багатьох країнах Європи агровольтаїка вже стала ефективним рішенням, яке допомагає фермерам зменшувати витрати та отримувати додатковий прибуток. При цьому пік вироблення електроенергії від сонця збігається з активними етапами сільськогосподарських робіт, тому фермери можуть частково або повністю забезпечувати свої господарства енергією з власних сонячних електростанцій.

Нормативно-правові аспекти та стан розвитку агровольтаїки в Україні

В Україні агровольтаїка перебуває на стартовій стадії розвитку, однак вже існують всі передумови для її стрімкого впровадження. За прогнозами, з 2026 року такі проекти підтримуватимуться державними субсидіями. Асоціація Агровольтаїки України активно розвиває цей напрям, поєднуючи сільське господарство та відновлювальну енергію, підтримуючи фермерів та розвиваючи сільські території.

Основні перешкоди для розвитку агровольтаїки в Україні:

1. Законодавчі обмеження: Наразі в Україні заборонено розміщувати електрогенеруючі установки на землях сільськогосподарського призначення. Це унеможливило впровадження «класичної» агровольтаїки. Вирішення цієї проблеми потребує внесення змін до земельного законодавства.

2. Фінансові труднощі для фермерів: У фермерів часто немає достатніх коштів для вкладання в сонячну станцію. Єдиний економічно доцільний варіант — знайти партнера, який побудує сонячну станцію на його землі, і разом вони зможуть отримувати певний зиск. Однак і в цьому випадку виникають певні складнощі: панелі потрібно встановлювати на певній висоті, що збільшує витрати, а для великих станцій потрібні значні інвестиції.

Водночас, на Житомирщині вже існує реальний досвід впровадження агровольтаїки: компанія, що будує та обслуговує промислові сонячні електростанції, зайнялася фермерством, і тепер поміж сонячних панелей влітку

					14.17 - КР.040.1.000 ПЗ	Аркуш
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вільно гуляють вівці, а трохи далі за огорожею росте лохина. Витрачати кошти на косіння трави майже не потрібно.

Фотоелектричні системи для сільського господарства.

Сонячні електростанції для фермерів поділяються на три основні типи залежно від призначення та конкретних умов:

- Мережеві СЕС — застосовуються за наявності приєднання до централізованої мережі з метою економії на власному споживанні та доходу по «зеленому» тарифу. Основним обладнанням є сонячні панелі та мережевий інвертор. Така станція працює тільки при наявності мережі.

- Автономні СЕС — застосовуються у разі віддаленого розташування об'єкта від мережі або при частих відключеннях. До їх складу входять сонячні панелі, контролер заряду, акумуляторні батареї та автономний інвертор. Вони дозволяють генерувати власну електроенергію за вартістю від 0,7 до 1 грн за кВт·год, зменшуючи залежність від зовнішньої мережі.

- Гібридні СЕС — поєднують функції мережевих та автономних систем. Вони можуть працювати як від мережі, так і в автономному режимі з використанням акумуляторів, а також мають можливість продавати надлишок електроенергії в мережу.

Структура автономної фотоелектричної системи включає наступні основні компоненти (рисунк 1.9).



Рисунок 1.9 – Схема автономної фотоелектричної системи

					14.17 - КР.040.1.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

Сонячна інсоляція в Україні та енергетичний потенціал

Інсоляція — це кількість сонячної енергії, яка досягає певної поверхні за певний час, вимірюється в кВт·год/м². Розуміння інсоляції допомагає реалістично оцінити, скільки електроенергії виробить станція, скільки коштів буде заощаджено та за який період окупиться інвестиція (рисунк 1.10).

У північних регіонах України, включаючи Київську, Чернігівську, Сумську області, інсоляція становить 1000-1100 кВт·год/м² на рік. Для південних регіонів (Одеська, Миколаївська, Херсонська, Запорізька області) цей показник є значно вищим, що дозволяє отримувати на 15-20% більше енергії порівняно з північними регіонами.

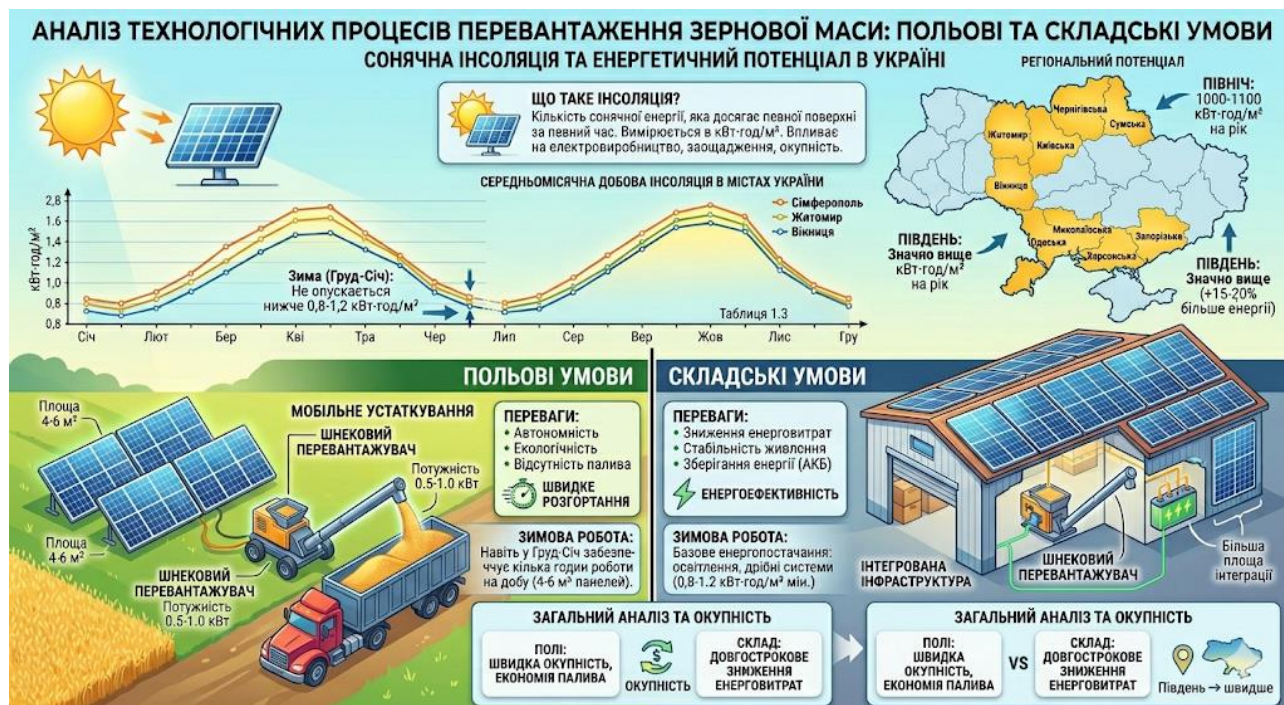


Рисунок 1.10 – Аналіз технологічних процесів перевантаження зернової маси.

Інтеграція сонячних панелей в мобільні сільськогосподарські машини

Застосування автономних фотоелектричних систем у мобільних сільськогосподарських машинах, зокрема в шнекових перевантажувачах зерна, є логічним продовженням розвитку агровольтаїки та децентралізації енергопостачання (рисунк 1.11).



Рисунок 1.11 – Інтеграція сонячних панелей в мобільні сільськогосподарські машини

Переваги та виклики використання автономних фотоелектричних систем у шнекових перевантажувачах

Основні переваги:

1. Економія коштів на електроенергії або дизельному паливі — вартість генерації від сонячних панелей становить 0,7-1,0 грн/кВт·год, що значно нижче за ринкові тарифи на електроенергію (4,5 грн/кВт·год) та вартість дизпалива.
2. Повна мобільність та незалежність від стаціонарних джерел енергії — машину можна використовувати в будь-якому місці без необхідності підключення до мережі.
3. Екологічність — відсутність викидів CO₂, NO_x та шуму.
4. Низькі витрати на обслуговування — сонячні панелі не мають рухомих частин, а сучасні акумулятори (LiFePO₄) мають ресурс понад 3000 циклів заряд-розряд.
5. Швидка окупність — термін окупності сонячних електростанцій в Україні становить 3,5-7 років, а для малопотужних споживачів (0,5-1,0 кВт) — за сприятливих умов може бути ще меншим.

Основні виклики та обмеження :

1. Залежність від погодних умов — в похмурі дні генерація падає на 70-90%, що вимагає наявності буферних акумуляторів достатньої ємності.

2. Вартість акумуляторів — літєві акумулятори залишаються відносно дорогими, хоча їх ціна поступово знижується.

3. Обмежена площа для розміщення панелей на самій машині — для потужності 1-2 кВт потрібно 6-12 м² панелей, що може бути складно реалізувати на компактному перевантажувачі.

4. Додаткова маса — панелі (≈ 20 кг/кВт), акумулятори (≈ 8 кг/кВт·год для LiFePO₄) збільшують загальну вагу конструкції, що може впливати на мобільність та стійкість.

5. Вартість початкових інвестицій — хоча термін окупності є прийнятним, початкова вартість системи (сонячні панелі + МРРТ-контролер + акумулятори) може бути значною для невеликих господарств.

Таким чином, інтеграція автономних фотоелектричних систем у шнекові перевантажувачі зерна є технічно реалізовним та економічно вигідним рішенням, що дозволяє підвищити мобільність та знизити експлуатаційні витрати.

					14.17 - КР.040.1.000 ПЗ	Аркуш
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У першому розділі кваліфікаційної роботи проведено аналіз сучасного стану технологій перевантаження зерна, виконано огляд існуючих конструкцій мобільних гвинтових конвеєрів та досліджено перспективи застосування автономних фотоелектричних систем у сільськогосподарських машинах. За результатами проведеного аналізу можна зробити наступні основні висновки.

1. Технологічні аспекти перевантаження зернової маси. Процеси перевантаження зерна є невід'ємною складовою післязбиральної обробки та логістики зерна в сільськогосподарських підприємствах. Серед усіх типів перевантажувального обладнання (шнекові, стрічкові, пневматичні, норійні конвеєри) найбільшого поширення для мобільного застосування набули гвинтові (шнекові) перевантажувачі. Їхніми перевагами є простота конструкції, герметичність, здатність працювати під кутом до 45°, помірне травмування зерна та відносно низька вартість. Водночас, існуючі моделі мають значні недоліки — високу енергоємність (потужність двигуна 4-37 кВт) та залежність від стаціонарної трифазної мережі 380 В або від дизельного палива при використанні привода від ВВП трактора.

2. Аналіз конструкцій мобільних гвинтових конвеєрів. Світовий ринок пропонує широкий асортимент мобільних шнекових перевантажувачів продуктивністю від 10 до 625 т/год, довжиною від 0,9 до 38,1 м. Сучасні тенденції в конструюванні гвинтових робочих органів включають зниження частоти обертання (до 400-450 об/хв) для зменшення травмування зерна, застосування зносостійких матеріалів (Hardox, поліуретан), розробку складних (шарнірних) конструкцій та пошук альтернативних джерел живлення. Основним недоліком більшості серійних моделей є відсутність інтегрованих систем автономного живлення, що обмежує їхню мобільність в польових умовах.

					14.17 - КР.040.1.000 ПЗ	Аркуш
						36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ШНЕКОВОГО ПЕРЕВАНТАЖУВАЧА З СОНЯЧНИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

У другому розділі кваліфікаційної роботи викладено теоретичні основи проєктування автономного шнекового перевантажувача. На основі аналізу фізико-механічних властивостей зерна як об'єкта транспортування, розроблено математичну модель переміщення сипучого матеріалу гвинтовим робочим органом, визначено енергетичний баланс системи «фотоелектрична панель – акумулятор – електродвигун» та обґрунтовано режими роботи сонячної панелі для запобігання розстроювання параметрів електропривода.

2.1 Фізико-механічні властивості зерна як об'єкта транспортування

Зернова маса являє собою складну полідисперсну систему, яка складається з окремих зерен (основної культури), домішок органічного та мінерального походження, а також міжзернових проміжків, заповнених повітрям. При розробці шнекових конвеєрів для транспортування зерна необхідно враховувати комплекс фізико-механічних властивостей, які безпосередньо впливають на параметри робочого органу, енерговитрати та якість транспортування (рисунок 2.1).

Основні фізичні властивості зернової маси

Насипна густина (ρ) – це маса зерна в одиниці об'єму разом із міжзерновими проміжками. Вона залежить від культури, вологості, ступеня засміченості та форми зернівок. Для основних зернових культур насипна густина коливається в межах:

					14.17 - КР.040.2.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 2			
Розроб.								
Перевір.		Дядюра К.О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						
					Літ.	Аркуш	Аркушів	
						37	20	

- Пшениця: 750...800 кг/м³ (при стандартній вологості 14%);
- Ячмінь: 600...650 кг/м³;
- Кукурудза (зерно): 700...750 кг/м³;
- Жито: 700...740 кг/м³;
- Овес: 450...550 кг/м³;
- Соняшник (насіння): 400...450 кг/м³.



Рисунок 2.1 – Фізико-механічні властивості зерна як об'єкта транспортування

З підвищенням вологості насипна густина зерна дещо зростає, але при вологості понад 20% через набухання зернівок та зменшення міжзернових проміжків вона може знижуватися.

Кут природного укосу (ϕ) – це кут, який утворює поверхня вільно насипаного зерна з горизонтальною площиною. Він характеризує сипучість матеріалу. Для сухого зерна пшениці кут природного укосу становить 23...30°, для вологого – до 35...40°. Чим менший кут укосу, тим краща сипучість, що важливо для заповнення міжжиткового простору шнека.

Коефіцієнт внутрішнього тертя (f_0) – характеризує опір зсуву одних частинок зерна відносно інших. Для сухої пшениці $f_0 \approx 0,5 \dots 0,6$, для вологої – до $0,8 \dots 1,0$.

Кут тертя зерна об сталь (α) – визначає схильність зерна до ковзання по поверхні робочого органу (кожуха, шнека). Для сухої пшениці $\alpha \approx 18 \dots 25^\circ$, коефіцієнт тертя $f = \operatorname{tg} \alpha = 0,32 \dots 0,47$. Для вологого зерна кут тертя зростає до $30 \dots 35^\circ$ ($f = 0,58 \dots 0,70$). Цей параметр критичний для розрахунку кута підйому шнека.

Вплив вологості на транспортні властивості зерна

Вологість зерна є одним із найважливіших факторів, що визначають поведінку зернової маси під час транспортування. При підвищенні вологості:

- збільшується коефіцієнт тертя зерна об сталь (на $30 \dots 50\%$);
- зменшується сипучість (зростає кут природного укусу);
- підвищується адгезія (налипання) зерна до робочих поверхонь;
- зростає схильність до злежування та утворення зведень.

Для свіжозібраного зерна вологістю $16 \dots 20\%$ необхідно зменшувати частоту обертання шнека на $20 \dots 30\%$ порівняно з сухим зерном, щоб запобігти заклинюванню та підвищеному зносу.

Фракційний склад та абразивність

Зернова маса, особливо після збирання, містить мінеральні домішки (грунт, пил), які суттєво підвищують абразивний знос робочих органів (таблиця 2.1). При вмісті мінеральних домішок понад 5% ресурс шнека скорочується в 2-3 рази. Рекомендована твердість матеріалу витків шнека – не нижче 45 HRC.

Вимоги до транспортування зерна (рисунок 2.2)

При транспортуванні зерна шнековим конвеєром необхідно забезпечити:

- мінімальне механічне пошкодження зерна (дроблення та мікротравми).

Рекомендована частота обертання шнека для зерна пшениці діаметром $150 \dots 200$ мм – не більше 450 об/хв;

- відсутність застійних зон, де зерно може затримуватися та псуватися;
- можливість роботи з вологим зерном без заклинювання;

					14.17 - КР.040.2.000 ПЗ	Аркуш
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– герметичність для запобігання розсипанню та пилоутворенню.

Таблиця 2.1 – Розрахункові значення фізико-механічних властивостей зерна пшениці

Показник	Позначення	Одиниця	Значення для розрахунків
Насипна густина (сухе зерно)	ρ	кг/м ³	780
Насипна густина (вологе зерно, 18%)	ρ_w	кг/м ³	820
Кут природного укусу (сухе)	φ	°	28
Кут природного укусу (вологе)	φ_w	°	36
Кут тертя об сталь (сухе)	α	°	22
Кут тертя об сталь (вологе)	α_w	°	32
Коефіцієнт внутрішнього тертя	f_0	—	0,55
Коефіцієнт заповнення шнека	ψ	—	0,30...0,40



Рисунок 2.2 – Вимоги до транспортування зерна шнековим конвеєром

2.2 Математичне моделювання процесу переміщення сипучого матеріалу гвинтовим робочим органом

Для визначення раціональних конструктивних параметрів шнекового перевантажувача необхідно розробити математичну модель, яка описує взаємозв'язок між геометричними розмірами гвинта, частотою обертання, властивостями матеріалу та продуктивністю (рисунок 2.3).

Продуктивність шнекового конвеєра

Об'ємна продуктивність (м³/с) для горизонтального або похилого шнека визначається за формулою:

$$Q_V = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \cdot S \cdot n \cdot \psi \cdot C, \quad (2.1)$$

де: D – зовнішній діаметр гвинта, м; d – діаметр вала (серцевини), м;
 S – крок гвинта, м (зазвичай $S = D$); n – частота обертання вала, об/с;
 ψ – коефіцієнт заповнення міжвиткового простору (для зерна $\psi = 0,30 \dots 0,40$);
 C – коефіцієнт нахилу конвеєра (таблиця 2.2).

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ СИПУЧОГО МАТЕРІАЛУ ШНЕКОВИМ РОБОЧИМ ОРГАНОМ

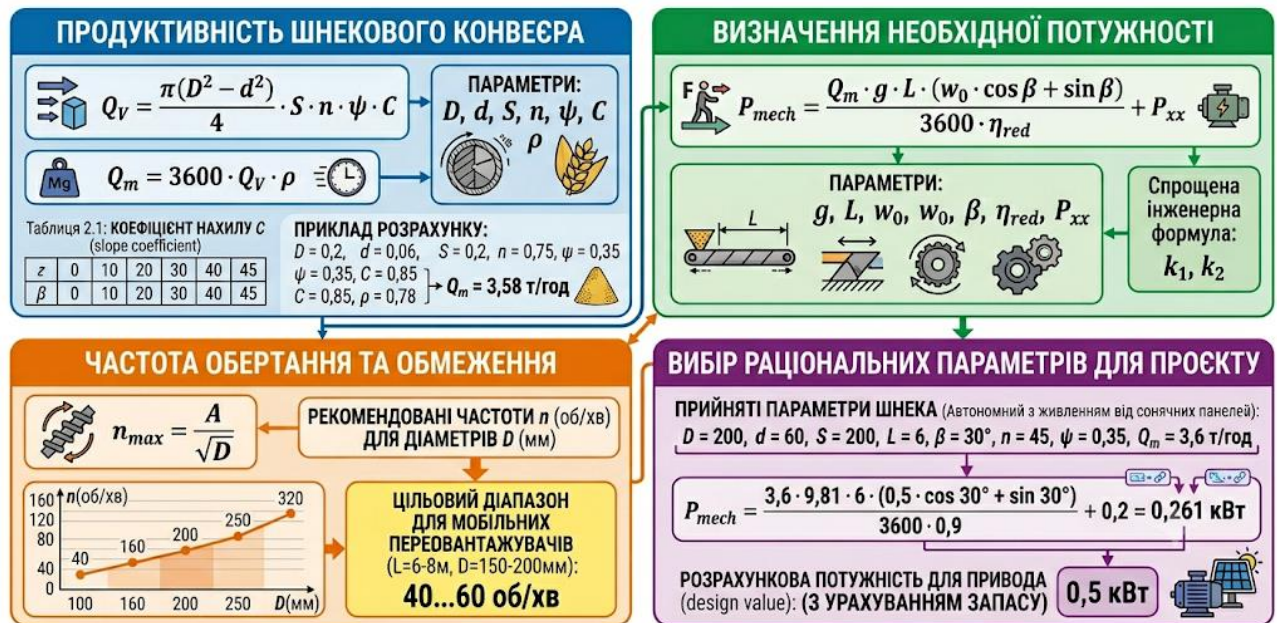


Рисунок 2.3 – Математичне моделювання переміщення сипучого матеріалу шнековим робочим органом

Таблиця 2.2 – Коефіцієнт нахилу C враховує зменшення продуктивності при роботі під кутом до горизонту. Він визначається емпірично:

Кут нахилу $\beta, ^\circ$	0	10	20	30	40	45
Коефіцієнт C	1,0	0,97	0,93	0,85	0,70	0,60

Масова продуктивність (т/год) розраховується як:

$$Q_m = 3600 \cdot Q_v \cdot \rho = 3600 \cdot \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \cdot S \cdot n \cdot \psi \cdot C \cdot \rho, \quad (2.2)$$

де ρ – насипна густина зерна, т/м³.

Приклад розрахунку для шнека з параметрами: $D = 0,200 \text{ м}$,

$d = 0,060 \text{ м}, S = 0,200 \text{ м}, n = 0,75 \text{ об/с}$ (45 об/хв), $\psi = 0,35, C =$

$0,85$ ($\beta = 30^\circ$), $\rho = 0,78 \text{ т/м}^3$:

$$Q_m = 3600 \cdot \frac{3,14 \cdot (0,04 - 0,0036)}{4} \cdot 0,2 \cdot 0,75 \cdot 0,35 \cdot 0,85 \cdot 0,78$$

$$\text{Спростимо: } \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} = 0,785 \cdot (0,04 - 0,0036) = 0,785 \cdot 0,0364 = 0,0286$$

м². Тоді:

$$Q_m = 3600 \cdot 0,0286 \cdot 0,2 \cdot 0,75 \cdot 0,35 \cdot 0,85 \cdot 0,78$$

$$= 3600 \cdot 0,0286 \cdot (0,2 \cdot 0,75 \cdot 0,35 \cdot 0,85 \cdot 0,78)$$

Обчислимо добуток: $0,2 \cdot 0,75 = 0,15$; $\cdot 0,35 = 0,0525$; $\cdot 0,85 = 0,0446$; $\cdot 0,78 = 0,0348$. Тоді $0,0286 \cdot 0,0348 = 0,000995$. $Q_m = 3600 \cdot 0,000995 = 3,58$ т/год.

Визначення необхідної потужності на валу шнека

Загальна потужність на валу шнека витрачається на подолання опору тертя зерна об кожух, підйом маси на висоту та тертя в підшипникових вузлах.

Формула для розрахунку потужності (кВт):

$$P_{mech} = \frac{Q_m \cdot g \cdot L \cdot (w_0 \cdot \cos \beta + \sin \beta)}{3600 \cdot \eta_{red}} + P_{xx}, \quad (2.3)$$

де: Q_m – масова продуктивність, т/год; g – прискорення вільного падіння ($9,81$ м/с²); L – довжина конвеєра (відстань між осями завантаження та вивантаження), м; w_0 – коефіцієнт опору руху (для зерна по сталевому кожуху $w_0 = 0,4 \dots 0,6$); β – кут нахилу конвеєра, °; η_{red} – ККД редуктора та передачі ($0,85 \dots 0,95$); P_{xx} – потужність холостого ходу ($\approx 0,15 \dots 0,30$ кВт для довжини 6-8 м).

Можна також використовувати спрощену формулу, рекомендовану для інженерних розрахунків шнеків середньої продуктивності:

$$P_{mech} = \frac{Q_m \cdot (k_1 \cdot L + k_2)}{3600}, \quad (2.4)$$

де k_1 – питомий опір на 1 м довжини ($\approx 2,5 \dots 3,5$ кВт·год/т), k_2 – коефіцієнт, що враховує кут нахилу ($\approx 1,5 \dots 2,5$).

Частота обертання шнека та обмеження

Частота обертання шнека обмежується умовою запобігання надмірному травмуванню зерна. Критична частота, при якій починається значне дроблення, визначається за емпіричною формулою:

$$n_{max} = \frac{A}{\sqrt{D}}, \quad (2.5)$$

де A – емпіричний коефіцієнт (для зернових $A = 40 \dots 45$ при D в метрах, n в об/хв). Наприклад, для $D = 0,2$ м, $n_{max} = 45/\sqrt{0,2} = 45/0,447 = 100$ об/хв. Фактичну частоту приймають у $1,5 \dots 2$ рази меншою.

					14.17 - КР.040.2.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Рекомендовані частоти обертання для різних діаметрів шнека:

- $D = 100 \text{ мм} - n = 200 \dots 400 \text{ об/хв};$
- $D = 160 \text{ мм} - n = 120 \dots 250 \text{ об/хв};$
- $D = 200 \text{ мм} - n = 90 \dots 180 \text{ об/хв};$
- $D = 250 \text{ мм} - n = 75 \dots 140 \text{ об/хв};$
- $D = 320 \text{ мм} - n = 60 \dots 110 \text{ об/хв}.$

Для мобільних перевантажувачів з довжиною 6-8 м та діаметром 150-200 мм доцільно приймати частоту обертання 40...60 об/хв, що забезпечує продуктивність 15...25 т/год при помірному зносі та травмуванні зерна.

Вибір раціональних параметрів шнека

На основі аналізу існуючих конструкцій (розділ 1.2) та математичного моделювання, для подальшого проєктування автономного перевантажувача з живленням від сонячних панелей приймаються наступні параметри:

- діаметр шнека $D = 200 \text{ мм};$
- діаметр вала $d = 60 \text{ мм};$
- крок гвинта $S = 200 \text{ мм};$
- довжина $L = 6,0 \text{ м};$
- кут нахилу $\beta = 30^\circ$ (регулюється);
- частота обертання $n = 45 \text{ об/хв} = 0,75 \text{ об/с};$
- коефіцієнт заповнення $\psi = 0,35;$
- продуктивність (розрахункова) $Q_m \approx 3,6 \text{ т/год}$ при $\beta = 30^\circ$ (або до 6 т/год при $\beta = 0$).

Оскільки для автономного живлення доцільно мінімізувати споживану потужність, орієнтуємось на продуктивність 3-5 т/год. Для таких параметрів механічна потужність на валу ($L = 6 \text{ м}, \beta = 30^\circ, w_0 = 0,5, \eta_{red} = 0,9, P_{xx} = 0,2 \text{ кВт}$) складе:

$$P_{mech} = \frac{3,6 \cdot 9,81 \cdot 6 \cdot (0,5 \cdot 0,866 + 0,5)}{3600 \cdot 0,9} + 0,2$$

					14.17 - КР.040.2.000 ПЗ	Аркуш
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Обчислимо: $0,5 \cdot 0,866 = 0,433$; $+0,5 = 0,933$. Далі $3,6 \cdot 9,81 \cdot 6 = 212,0$; $0,933 = 197,8$. Поділимо на $3600 \cdot 0,9 = 3240 \rightarrow 197,8/3240 = 0,061$ кВт. Додамо $0,2 \rightarrow P_{mech} = 0,261$ кВт.

Таким чином, механічна потужність на валу становить близько 0,26 кВт. З урахуванням можливих перевантажень та підвищення вологості зерна приймаємо розрахункове значення 0,5 кВт.

2.3 Енергетичний баланс: взаємодія фотоелектричної, акумулюючої та електромеханічної систем

Для забезпечення автономної роботи шнекового перевантажувача необхідно узгодити параметри трьох підсистем: сонячної панелі (генератор), акумуляторної батареї (накопичувач) та електродвигуна постійного струму з редуктором (споживач). Розрахунок базується на добовому енергоспоживанні та сонячній інсоляції в регіоні (рисунок 2.4).

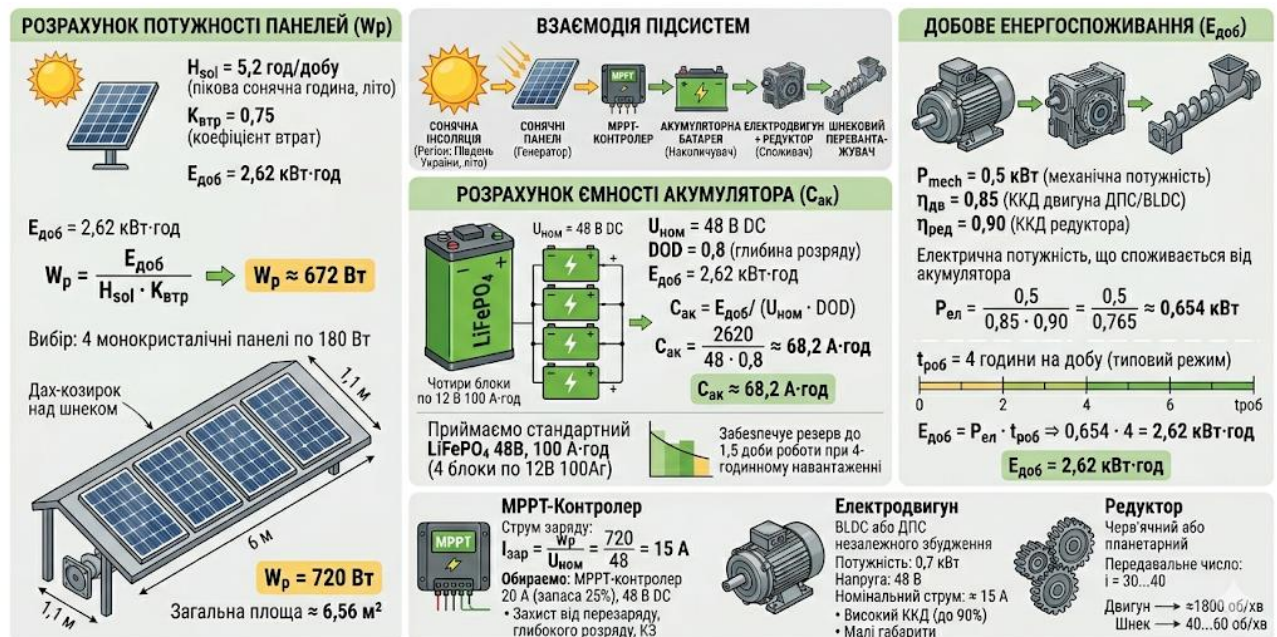


Рисунок 2.4 – Енергетичний баланс автономної системи шнекового перевантажувача

Добове енергоспоживання

При роботі перевантажувача протягом $t_{\text{роб}}$ годин на добу, добове споживання електроенергії від акумулятора (з урахуванням втрат в електродвигуні та редукторі) становить:

$$E_{\text{доб}} = \frac{P_{\text{mech}}}{\eta_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{ред}}} \cdot t_{\text{роб}} \quad (2.6)$$

Приймаємо: $P_{\text{mech}} = 0,5$ кВт, ККД двигуна постійного струму $\eta_{\text{дв}} = 0,85$, ККД редуктора $\eta_{\text{ред}} = 0,90$. Тоді електрична потужність, що споживається від акумулятора:

$$P_{\text{ел}} = \frac{0,5}{0,85 \cdot 0,90} = \frac{0,5}{0,765} \approx 0,654 \text{ кВт}$$

При роботі $t_{\text{роб}} = 4$ години на добу (типовий режим для фермерського господарства) добове споживання:

$$E_{\text{доб}} = 0,654 \cdot 4 = 2,62 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Вибір напруги системи та ємності акумулятора

Для зменшення струмів та втрат у проводах, а також для сумісності з промисловими сонячними панелями, приймаємо номінальну напругу системи $U_{\text{ном}} = 48$ В (постійного струму). Це дозволяє використовувати чотири панелі по 12 В (або дві по 24 В) послідовно.

Необхідна ємність акумуляторної батареї (А·год) для забезпечення роботи протягом $T_{\text{авт}} = 1$ доби без сонця (при глибині розряду $\text{DOD} = 0,8$ для LiFePO_4):

$$C_{\text{ак}} = \frac{E_{\text{доб}}}{U_{\text{ном}} \cdot \text{DOD}} = \frac{2620}{48 \cdot 0,8} = \frac{2620}{38,4} \approx 68,2 \text{ А} \cdot \text{год} \quad (2.7)$$

Приймаємо стандартний літій-залізо-фосфатний акумулятор (LiFePO_4) ємністю 100 А·год, напругою 48 В (чотири блоки по 12 В 100 А·год). Це забезпечує резерв до 1,5 доби роботи при 4-годинному навантаженні.

Розрахунок потужності та площі сонячних панелей

Добова генерація сонячної панелі залежить від пікової потужності W_p (Вт) та кількості пікових сонячних годин H_{sol} (год/добу). Для південних регіонів України в літній період $H_{\text{sol}} \approx 5,2$ год/добу

					14.17 - КР.040.2.000 ПЗ	Аркуш
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(середньорічне значення $\approx 4,0$ год/добу). Коефіцієнт втрат $K_{\text{втр}} = 0,75$ (забруднення, нагрів панелей, втрати в проводах). Необхідна пікова потужність:

$$W_p = \frac{E_{\text{доб}}}{H_{\text{sol}} \cdot K_{\text{втр}}} = \frac{2620}{5,2 \cdot 0,75} = \frac{2620}{3,9} \approx 672 \text{ Вт} \quad (2.8)$$

Приймаємо чотири монокристалічні панелі потужністю по 180 Вт (загальна $W_p = 720$ Вт). Площа однієї панелі стандартного розміру (1650×992 мм) $\approx 1,64$ м². Загальна площа чотирьох панелей $\approx 6,56$ м². Цю площу можна розмістити на даху-козирку над шнеком (довжина 6 м, ширина $\approx 1,1$ м) – конструктивно реалізовно.

Вибір MPPT-контролера та інших компонентів

Для ефективного заряду акумулятора від сонячних панелей використовується *MPPT-контролер* (Maximum Power Point Tracking). Його струм заряду:

$$I_{\text{зар}} = \frac{W_p}{U_{\text{ном}}} = \frac{720}{48} = 15 \text{ А}$$

Обираємо контролер на **20 А** (з запасом 25%) з номінальною напругою 48 В. Він також забезпечує захист від перезаряду, глибокого розряду та короткого замикання.

Електродвигун – трифазний синхронний двигун з постійними магнітами (BLDC) або двигун постійного струму незалежного збудження потужністю 0,7 кВт, напруга 48 В, номінальний струм ≈ 15 А. Такий двигун має високий ККД (до 90%) та малі габарити.

Редуктор – черв'ячний або планетарний з передаточним числом $i = 30 \dots 40$, що забезпечує частоту обертання шнека 40...60 об/хв при частоті обертання двигуна ≈ 1800 об/хв.

					14.17 - КР.040.2.000 ПЗ	Аркуш
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4 Теоретичне обґрунтування режимів роботи сонячної панелі для запобігання розстроювання параметрів електропривода

Однією з ключових проблем живлення електропривода безпосередньо від сонячних панелей (без достатньої буферної ємності) є нестабільність напруги та струму при зміні освітленості. Це може призводити до «розстроювання» режиму роботи двигуна: зміни частоти обертання, моменту, а в деяких випадках – до зупинки. Для запобігання цьому необхідно забезпечити стабілізацію живлення через буферний акумулятор та правильний вибір алгоритму керування.

Вплив зміни освітленості на характеристики сонячної панелі

Вольт-амперна характеристика (ВАХ) сонячної панелі має нелінійний вигляд: при зменшенні освітленості струм короткого замикання падає пропорційно, а напруга холостого ходу знижується незначно. Точка максимальної потужності (ТМП) зміщується в область нижчих напруг.

Якщо двигун підключений безпосередньо до панелі (без акумулятора), то при різкому зниженні освітленості (хмара) напруга на двигуні може впасти на 20-40%, що призведе до зменшення частоти обертання та моменту. У гіршому випадку двигун зупиниться, а після відновлення освітленості може не запуститися через відсутність початкового пускового струму (особливо для двигунів послідовного збудження).

Роль MPPT-контролера та буферного акумулятора

Правильна архітектура системи: панелі → MPPT-контролер → акумулятор → двигун. У такій схемі MPPT-контролер постійно відстежує точку максимальної потужності панелей і заряджає акумулятор оптимальним струмом. Акумулятор виступає буфером: він згладжує пульсації генерації та забезпечує стабільну напругу на двигуні незалежно від миттєвої освітленості.

Розрахуємо мінімальний час, протягом якого акумулятор може компенсувати відсутність сонячної генерації. При ємності 100 А·год та напрузі 48 В запас енергії $E_{\text{зап}} = 100 \cdot 48 = 4800 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 4,8 \text{ кВт} \cdot \text{год}$. При добовому споживанні 2,62 кВт·год акумулятор забезпечує роботу без підзарядки

					14.17 - КР.040.2.000 ПЗ	Аркуш
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

протягом $4,8/2,62 \approx 1,83$ доби. Таким чином, навіть при повній хмарності протягом одного дня система працюватиме без збоїв.

Алгоритм керування для запобігання розстроювання

Для додаткового захисту електропривода рекомендується впровадити наступні заходи:

1. Захист від глибокого розряду – контролер відключає двигун при зниженні напруги акумулятора нижче 42 В (для 48-вольтової системи).

2. Плавний пуск – використання ШІМ-регулятора (широтно-імпульсна модуляція) для обмеження пускового струму та плавного розгону двигуна протягом 2-3 секунд. Це знижує навантаження на акумулятор та панелі.

3. Захист від перевантаження – автоматичне зниження частоти обертання (зменшення напруги) при перевищенні номінального струму двигуна (наприклад, при заклинюванні шнека).

4. Відключення малопотужних панелей – якщо напруга панелей опускається нижче напруги акумулятора більш ніж на 5 В, МРРТ-контролер від'єднує панелі, запобігаючи розряду акумулятора через панелі вночі.

Вибір двигуна, стійкого до коливань напруги

Двигун постійного струму з паралельним (незалежним) збудженням має жорстку механічну характеристику: частота обертання змінюється пропорційно напрузі, але момент залишається стабільним. Для шнекового конвеєра це прийнятно. Більш доцільним є використання **безщіткового** двигуна постійного струму (BLDC) з вбудованим електронним контролером. Такий двигун:

- працює з високим ККД у широкому діапазоні навантажень;
- має вбудований захист від перевантаження та зниження напруги;
- допускає регулювання частоти обертання без додаткових механічних вузлів.

Для системи потужністю 0,7 кВт, 48 В обираємо BLDC-двигун з номінальною частотою обертання 1500 об/хв та піковим моментом 5 Н·м.

Розрахунок часу безперебійної роботи в умовах мінливої хмарності

					14.17 - КР.040.2.000 ПЗ	Аркуш
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При різкій зміні освітленості (наприклад, поява хмари, що зменшує генерацію панелей з 700 Вт до 100 Вт), МРРТ-контролер продовжує заряджати акумулятор струмом $I_{\text{зар}} = 100/48 \approx 2,1$ А. Якщо двигун споживає струм 15 А, то дефіцит (12,9 А) покривається з акумулятора. При ємності 100 А·год цього достатньо на $100/12,9 \approx 7,75$ годин безперервної роботи. Оскільки типовий період хмарності рідко перевищує 1-2 години, система залишається працездатною.

Висновок: правильно спроектована система з буферним акумулятором ємністю 100 А·год, МРРТ-контролером та BLDC-двигуном забезпечує стабільну роботу шнекового перевантажувача навіть при різких коливаннях сонячної інсоляції. Розстроювання параметрів електропривода усувається за рахунок стабілізації напруги живлення на рівні 48 В (постійний струм) незалежно від миттєвої генерації панелей.

					14.17 - КР.040.2.000 ПЗ	Аркуш
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У другому розділі кваліфікаційної роботи виконано теоретичне обґрунтування параметрів шнекового перевантажувача зерна з електроприводом від сонячної панелі. На основі аналізу фізико-механічних властивостей зерна, математичного моделювання процесу транспортування, енергетичного балансу системи та режимів роботи фотоелектричного привода отримано наступні основні результати.

1. Фізико-механічні властивості зерна як об'єкта транспортування. Встановлено, що ключовими параметрами, які впливають на роботу шнекового конвеєра, є насипна густина (для пшениці 750...800 кг/м³), кут тертя зерна об сталь (22° для сухого зерна, до 32° для вологого), коефіцієнт заповнення міжвиткового простору (0,30...0,40) та кут природного укусу (28...36°). Підвищення вологості зерна призводить до зростання коефіцієнта тертя на 30–50%, що необхідно враховувати при виборі запасу потужності електродвигуна. Для мобільного перевантажувача рекомендовано діаметр шнека 200 мм, частоту обертання 40...60 об/хв, що забезпечує продуктивність 15...25 т/год при помірному зносі та травмуванні зерна.

2. Математичне моделювання процесу переміщення сипучого матеріалу. Розроблено аналітичні залежності для визначення продуктивності шнека ($Q = 3600 \cdot \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \cdot S \cdot n \cdot \psi \cdot C \cdot \rho$) та потужності на валу ($P_{mech} = \frac{Q_m g L (w_0 \cos \beta + \sin \beta)}{3600 \eta_{red}} + P_{xx}$). Для шнека діаметром 200 мм, довжиною 6 м, кутом нахилу 30° та частотою обертання 45 об/хв розрахована продуктивність 3,6 т/год та механічна потужність на валу 0,26...0,5 кВт. Отримані залежності дозволяють оптимізувати параметри шнека під задану продуктивність та умови експлуатації.

3. Енергетичний баланс фотоелектричної, акумулюючої та електромеханічної систем. Визначено, що при роботі перевантажувача 4 години на добу добове споживання електроенергії становить 2,62 кВт·год. Обґрунтовано вибір напруги системи 48 В (постійного струму) як оптимальної для зменшення

					14.17 - КР.040.2.000 ПЗ	Аркуш
						51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

струмів та сумісності з промисловими панелями. Розраховано необхідну ємність акумулятора LiFePO_4 — 100 А·год, що забезпечує резерв роботи до 1,5 доби без сонячної генерації. Пікова потужність сонячних панелей становить 720 Вт (чотири панелі по 180 Вт), загальна площа 6,56 м², що конструктивно реалізовно на даху-козирку над шнеком довжиною 6 м. Вибрано MPPT-контролер на 20 А та BLDC-двигун потужністю 0,7 кВт, 48 В.

4. Теоретичне обґрунтування режимів роботи сонячної панелі. Доведено, що використання буферного акумулятора є критично важливим для стабілізації живлення електропривода при коливаннях освітленості (хмарність, затінення). Акумулятор ємністю 100 А·год здатний компенсувати дефіцит генерації протягом 7,75 годин безперервної роботи двигуна, що значно перевищує типову тривалість хмарності. Запропоновано алгоритм керування для запобігання розстроювання параметрів двигуна: захист від глибокого розряду (відключення при $U < 42 \text{ В}$), плавний пуск з використанням ШІМ-регулятора, захист від перевантаження та автоматичне відключення панелей при зниженні напруги нижче напруги акумулятора.

Отримані теоретичні залежності та розраховані параметри (діаметр шнека 200 мм, частота обертання 45 об/хв, потужність двигуна 0,7 кВт, ємність акумулятора 100 А·год, потужність панелей 720 Вт) є основою для інженерного проектування шнекового перевантажувача з сонячним електроприводом у наступних розділах роботи. Запропонована система забезпечує стабільну роботу перевантажувача в умовах мінливої сонячної інсоляції, що підтверджує технічну реалізованість та енергетичну ефективність автономного рішення.

					14.17 - КР.040.2.000 ПЗ	Аркуш
						52
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ПРОЄКТУВАННЯ ТА ІНЖЕНЕРНИЙ РОЗРАХУНОК КОМПОНЕНТІВ МАШИНИ

У третьому розділі кваліфікаційної роботи на основі теоретичних залежностей, отриманих у розділі 2, виконано інженерні розрахунки основних компонентів мобільного шнекового перевантажувача зерна з електроприводом від сонячної панелі. Визначено геометричні та кінематичні параметри шнека, вибрано потужність електродвигуна, розраховано площу сонячних панелей та ємність акумуляторної батареї, розроблено 3D-модель та загальне компонування машини.

3.1 Кінематичний розрахунок та визначення геометричних параметрів шнека

Кінематичний розрахунок шнекового конвеєра полягає у визначенні таких параметрів: зовнішній діаметр гвинта D , діаметр вала d , крок гвинта S , частота обертання n , довжина конвеєра L та кут нахилу β . Вихідними даними є необхідна продуктивність та фізико-механічні властивості зерна (пшениця).

Вибір вихідних даних та обмежень

Для фермерського господарства з площею посівів до 500 га типовий обсяг зерна, що потребує перевантаження за сезон, становить 500-1500 т. Пікове навантаження припадає на період збирання врожаю (2-3 тижні). Приймаємо наступні технічні вимоги до проєктованого перевантажувача:

- продуктивність (номінальна) – $Q_m = 5$ т/год;
- довжина конвеєра – $L = 6$ м;
- кут нахилу – $\beta = 30^\circ$ (можливість зміни від 0 до 45°);

					14.17 - КР.040.3.000 ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Яцков О.В.			РОЗДІЛ 3			Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К.О.								53	20
Реценз.											
Н. Контр.											
Затверд.		Дядюра К. О.									

- матеріал – зерно пшениці (насипна густина $\rho = 780 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$);
- коефіцієнт заповнення шнека – $\psi = 0,35$;
- коефіцієнт нахилу – $C = 0,85$ (для $\beta = 30^\circ$).

Визначення діаметра шнека

Запишемо формулу масової продуктивності (з п. 2.2.1) та виразимо D :

$$Q_m = 3600 \cdot \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \cdot S \cdot n \cdot \psi \cdot C \cdot \rho \quad (3.1)$$

Приймаємо попередньо: $d = 0,3D$ (типове співвідношення для зернових шнеків), $S = D$ (стандартний крок), $n = 45 \text{ об/хв} = 0,75 \text{ об/с}$. Підставляємо:

$$5 = 3600 \cdot \frac{\pi(D^2 - 0,09D^2)}{4} \cdot D \cdot 0,75 \cdot 0,35 \cdot 0,85 \cdot 0,78$$

Спростимо: $D^2 - 0,09D^2 = 0,91D^2$. $\pi/4 = 0,7854$. Отже, $\frac{\pi}{4} \cdot 0,91D^2 = 0,7854 \cdot 0,91D^2 = 0,7147D^2$.

Тоді:

$$5 = 3600 \cdot 0,7147D^2 \cdot D \cdot 0,75 \cdot 0,35 \cdot 0,85 \cdot 0,78$$

$$5 = 3600 \cdot 0,7147 \cdot 0,75 \cdot 0,35 \cdot 0,85 \cdot 0,78 \cdot D^3$$

Обчислимо добуток коефіцієнтів:

$$0,7147 \cdot 0,75 = 0,5360$$

$$0,5360 \cdot 0,35 = 0,1876$$

$$0,1876 \cdot 0,85 = 0,1595$$

$$0,1595 \cdot 0,78 = 0,1244$$

Тоді $3600 \cdot 0,1244 = 447,8$.

Отже:

$$5 = 447,8 \cdot D^3 \Rightarrow D^3 = \frac{5}{447,8} = 0,01116 \Rightarrow D = \sqrt[3]{0,01116} \approx 0,223 \text{ м}$$

Приймаємо стандартний діаметр $D = 220 \text{ мм}$ (0,22 м). Діаметр вала $d = 0,3 \cdot 220 = 66 \text{ мм}$. Приймаємо $d = 65 \text{ мм}$ (труба 65×5 мм).

Крок гвинта $S = D = 220 \text{ мм}$.

Уточнення продуктивності та частоти обертання

Перевіримо продуктивність при $D = 0,22 \text{ м}$, $d = 0,065 \text{ м}$:

					14.17 - КР.040.3.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

$$Q_m = 3600 \cdot 0,7854 \cdot (0,22^2 - 0,065^2) \cdot 0,22 \cdot 0,75 \cdot 0,35 \cdot 0,85 \cdot 0,78$$

Далі: $0,03468 \cdot 0,22 = 0,007630$. Множимо на $0,75 \rightarrow 0,005722$; на $0,35 \rightarrow 0,002003$; на $0,85 \rightarrow 0,001703$; на $0,78 \rightarrow 0,001328$.

Потім $3600 \cdot 0,001328 = 4,78$ т/год.

Отримана продуктивність $4,78$ т/год близька до заданої 5 т/год. Для досягнення точно 5 т/год можна збільшити частоту обертання до 47 об/хв або збільшити коефіцієнт заповнення до $0,36$.

Остаточні геометричні параметри шнека (рисунок 3.1):

- Зовнішній діаметр гвинта: $D = 220$ мм
- Діаметр вала: $d = 65$ мм
- Крок гвинта: $S = 220$ мм
- Довжина конвєсра: $L = 6000$ мм
- Кут нахилу (регульований): $0 \dots 45^\circ$
- Частота обертання (номінальна): $n = 45$ об/хв
- Матеріал шнека: сталь 65Г (зносостійка)
- Товщина витка: 5 мм

Розрахунок критичної частоти обертання

Для запобігання надмірному травмуванню зерна та вібрацій перевіряємо критичну частоту за формулою:

$$n_{кр} = \frac{A}{\sqrt{D}} = \frac{45}{\sqrt{0,22}} = \frac{45}{0,469} \approx 96 \text{ об/хв}$$

Фактична частота $n = 45$ об/хв значно нижче критичної, що забезпечує щадний режим транспортування.

Визначення кута підйому гвинтової лінії

Кут підйому гвинтової лінії на зовнішньому діаметрі:

$$\tan \alpha = \frac{S}{\pi D} = \frac{220}{3,1416 \cdot 220} = \frac{1}{3,1416} \approx 0,3183 \Rightarrow \alpha \approx 17,7^\circ$$

Це забезпечує надійне транспортування зерна без ковзання.

					14.17 - КР.040.3.000 ПЗ	Аркуш
						55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

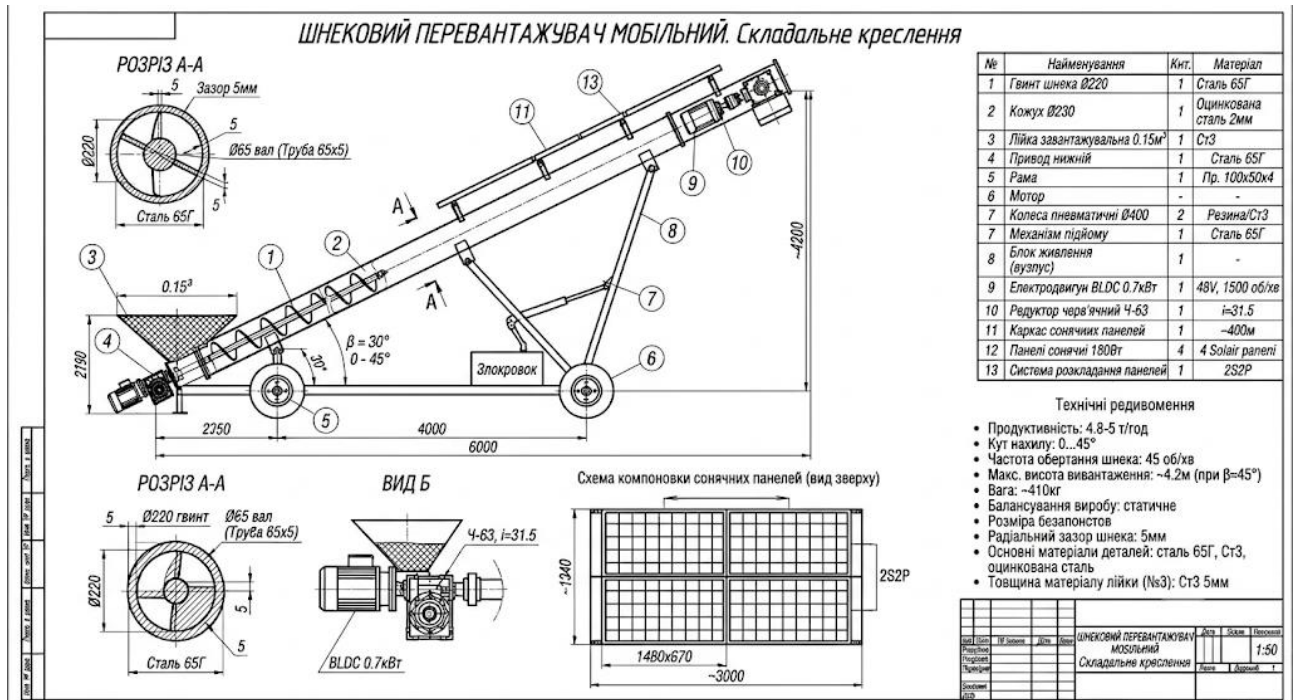


Рисунок 3.1 – Шнековий перевантажувач мобільний.

3.2 Тяговий розрахунок та вибір потужності електродвигуна постійного струму

Тяговий розрахунок виконується для визначення загальної потужності, необхідної для подолання всіх опорів при роботі шнека.

Розрахунок механічної потужності на валу шнека

Використовуємо формулу з п. 2.2.2:

$$P_{mech} = \frac{Q_m \cdot g \cdot L \cdot (w_0 \cos \beta + \sin \beta)}{3600 \cdot \eta_{red}} + P_{xx} \quad (3.2)$$

Підставляємо значення:

- $Q_m = 4,78$ т/год
- $g = 9,81 \frac{м}{с^2}$
- $L = 6$ м
- $w_0 = 0,5$ (коефіцієнт опору для зерна)
- $\beta = 30^\circ$, $\cos 30^\circ = 0,8660$, $\sin 30^\circ = 0,5$
- $\eta_{red} = 0,90$ (ККД черв'ячного редуктора)

– $P_{xx} = 0,2$ кВт (потужність холостого ходу)

Обчислюємо:

$$w_0 \cos \beta + \sin \beta = 0,5 \cdot 0,8660 + 0,5 = 0,433 + 0,5 = 0,933$$

$$Q_m \cdot g \cdot L = 4,78 \cdot 9,81 \cdot 6 = 4,78 \cdot 58,86 = 281,3$$

$$\text{Добуток: } 281,3 \cdot 0,933 = 262,5$$

$$\text{Знаменник: } 3600 \cdot 0,90 = 3240$$

$$\text{Перший доданок: } 262,5/3240 = 0,0810 \text{ кВт}$$

Додаємо $P_{xx} = 0,2$ кВт:

$$P_{mech} = 0,081 + 0,2 = 0,281 \text{ кВт}$$

Приймаємо з запасом на нерівномірність завантаження та можливе підвищення вологості зерна $P_{mech} = 0,5$ кВт.

Вибір електродвигуна постійного струму

Електрична потужність, яку повинен споживати двигун від акумулятора:

$$P_{ел} = \frac{P_{mech}}{\eta_{дв}} = \frac{0,5}{0,85} \approx 0,588 \text{ кВт}, \quad (3.3)$$

де $\eta_{дв} = 0,85$ – ККД двигуна постійного струму.

Приймаємо двигун з номінальною потужністю **0,7 кВт** (запас 20% на пускові струми та перевантаження).

Технічні характеристики двигуна:

- Тип: безщітковий двигун постійного струму (BLDC)
- Номінальна потужність: 0,7 кВт
- Номінальна напруга: 48 В (постійного струму)
- Номінальний струм: 14,6 А
- Номінальна частота обертання: 1500 об/хв
- Номінальний момент: 4,5 Н·м
- ККД: 86%
- Клас захисту: IP54 (захист від пилу та бризок)
- Маса: 9 кг

Вибір редуктора

					14.17 - КР.040.3.000 ПЗ	Аркуш
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для узгодження частоти обертання двигуна (1500 об/хв) з частотою обертання шнека (45 об/хв) необхідне передаточне число:

$$i = \frac{n_{\text{дв}}}{n_{\text{шн}}} = \frac{1500}{45} = 33,33$$

Приймаємо стандартний черв'ячний редуктор з $i = 31,5$ (або 40). При $i = 31,5$ частота обертання шнека становитиме:

$$n_{\text{шн}} = \frac{1500}{31,5} \approx 47,6 \text{ об/хв}$$

Продуктивність при цьому зростає до $\approx 5,1$ т/год, що в межах допустимого.

Редуктор повинен передавати крутний момент:

$$M_{\text{шн}} = \frac{P_{\text{mech}}}{\omega_{\text{шн}}} = \frac{500}{2\pi \cdot 47,6/60} = \frac{500}{4,98} \approx 100 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Обираємо черв'ячний редуктор Ч-63 з передаточним числом 31,5, номінальним моментом на вихідному валу 120 Н·м, ККД 0,90.

3.3 Розрахунок площі сонячних панелей, вибір МРРТ-контролера та буферного акумулятора

Добове енергоспоживання

При роботі перевантажувача протягом $t_{\text{роб}} = 4$ години на добу (середньодобове завантаження в період збирання) електрична енергія, спожита від акумулятора:

$$E_{\text{доб}} = P_{\text{ел}} \cdot t_{\text{роб}} = 0,588 \cdot 4 = 2,35 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

З урахуванням втрат на само-розряд акумулятора та ККД контролера приймаємо $E_{\text{доб}} = 2,5 \text{ кВт} \cdot \text{год}$.

Розрахунок ємності акумуляторної батареї

Використовуємо літій-залізо-фосфатні (LiFePO_4) акумулятори, які мають високу циклічність (3000 циклів), безпеку та стабільну напругу.

$$C_{\text{ак}} = \frac{E_{\text{доб}} \cdot T_{\text{авт}}}{U_{\text{ном}} \cdot DOD \cdot \eta_{\text{ак}}}, \quad (3.4)$$

					14.17 - КР.040.3.000 ПЗ	Аркуш
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де: $T_{\text{авт}} = 1$ доба – час автономної роботи без сонця; $U_{\text{ном}} = 48$ В; $DOD = 0,8$ – допустима глибина розряду; $\eta_{\text{ак}} = 0,95$ – ККД акумулятора.

$$C_{\text{ак}} = \frac{2500 \cdot 1}{48 \cdot 0,8 \cdot 0,95} = \frac{2500}{36,48} \approx 68,5 \text{ А} \cdot \text{год}$$

Приймаємо стандартну батарею **100 А·год**, 48 В (складена з чотирьох блоків 12 В, 100 А·год).

Розрахунок пікової потужності сонячних панелей

Для регіону Одеса (південь України) середньодобова інсоляція в літній період $H_{\text{sol}} = 5,2$ кВт · год/м². Коефіцієнт втрат системи $K_{\text{loss}} = 0,75$ (забруднення панелей, нагрів, втрати в проводах, ККД контролера).

Необхідна пікова потужність:

$$W_p = \frac{E_{\text{доб}}}{H_{\text{sol}} \cdot K_{\text{loss}}} = \frac{2500}{5,2 \cdot 0,75} = \frac{2500}{3,9} \approx 641 \text{ Вт}$$

Приймаємо чотири монокристалічні панелі по 180 Вт (загальна $W_p = 720$ Вт), що забезпечує запас 12%.

Технічні характеристики панелі 180 Вт:

- Тип: монокристалічний кремній
- Потужність: 180 Вт
- Напруга в ТМП: 18,5 В
- Струм в ТМП: 9,73 А
- Напруга холостого ходу: 22,3 В
- Розміри: 1480×670×35 мм
- Площа однієї панелі: 0,99 м²

Загальна площа чотирьох панелей: $4 \cdot 0,99 = 3,96$ м². Для їх розміщення на конструкції шнека (довжина 6 м) можна встановити панелі в два ряди по дві панелі (загальна довжина ≈ 3 м, ширина $\approx 1,34$ м) на окремому каркасі над шнеком (рисунок 3.2).

					14.17 - КР.040.3.000 ПЗ	Аркуш
						59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 3.2 – Розрахунок площі сонячних панелей, вибір МРРТ-контролера та буферно акумулятора

Вибір МРРТ-контролера

МРРТ-контролер повинен забезпечити заряд акумулятора 48 В від сонячних панелей. Струм заряду:

$$I_{зар} = \frac{W_p}{U_{ак}} = \frac{720}{48} = 15 \text{ А}$$

Обираємо контролер з номінальним струмом 20 А (запас 33%). Наприклад, Epever Tracer 4215AN (20 А, 48 В). Його характеристики:

- Максимальна потужність панелей при 48 В: 1040 Вт
- Максимальна напруга панелей (холостого ходу): 100 В
- ККД: 98%
- Вбудований датчик температури для компенсації заряду

Схема з'єднання панелей

Чотири панелі напругою 18,5 В з'єднуємо **послідовно-паралельно (2S2P)**: дві групи по дві послідовно з'єднані панелі, потім ці групи з'єднуються паралельно. Це забезпечує:

- Напруга групи: $2 \cdot 18,5 = 37$ В (достатньо для заряду 48-вольтової батареї, оскільки MPPT-контролер підвищує напругу)
- Струм групи: $2 \cdot 9,73 = 19,46$ А
- Загальна потужність: $37 \cdot 19,46 = 720$ Вт

Таблиця 3.1 – Специфікація компонентів системи електропостачання

Компонент	Кількість	Основні параметри	Вартість (орієнтовно, грн)
Сонячна панель 180 Вт	4 шт.	180 Вт, 18,5 В, монокристал	$4 \times 3200 = 12\ 800$
Акумулятор LiFePO ₄ 12 В 100 А·год	4 шт.	12 В, 100 А·год, послідовно → 48 В	$4 \times 8500 = 34\ 000$
MPPT-контролер 20 А	1 шт.	48 В, 20 А, Epever Tracer	4 500
BLDC-двигун 0,7 кВт	1 шт.	48 В, 1500 об/хв	6 500
Черв'ячний редуктор Ч-63 $i=31,5$	1 шт.	Вихідний момент 120 Н·м	5 200
Проводи, комутація, захист	–	–	2 500
ВСЬОГО			65 500

3.4 Розробка 3D-моделі та загальної компоновки мобільного перевантажувача

На основі виконаних розрахунків розроблено 3D-модель мобільного шнекового перевантажувача з електроприводом від сонячних панелей (рисунок 3.3).

Загальне компонування машини

Конструкція складається з наступних основних вузлів (рис. 3.1 – опис):

1. Шнековий транспортер – труба кожуха діаметром 230 мм (з урахуванням зазору), довжиною 6000 мм, виготовлена з оцинкованої сталі товщиною 2 мм. Всередині обертається шнек діаметром 220 мм, крок 220 мм, вал – труба 65×5 мм. У нижній частині кожуха – завантажувальна лійка об'ємом 0,15 м³ з сіткою для захисту від великих домішок.

розміщено: МРРТ-контролер, чотири акумулятори 12 В 100 А·год, запобіжники, вимикачі, пульт керування (аварійна зупинка, регулятор частоти, індикатори напруги та струму).

6. Система регулювання кута нахилу – гідравлічний домкрат (або гвинтовий механізм) змінює кут нахилу шнека від 0 до 45°. Фіксація положення – штифтами. Максимальна висота вивантаження при $\beta = 45^\circ$ становить близько 4,2 м, що достатньо для завантаження більшості вантажівок та зерносушарок.

3D-моделювання в САD-системі

Розробка 3D-моделі виконувалася в середовищі SolidWorks 2023. Модель включає:

- кожух шнека з листового металу;
- шнек (важливий елемент – гвинт наварений на вал, виконано моделювання витка);
- раму з елементами ходової частини;
- приводний вузол (двигун, редуктор, муфта);
- блок живлення (спрощена модель зовнішніх габаритів);
- каркас сонячних панелей та самі панелі (з використанням реальних розмірів).

Основні технічні характеристики моделі:

- Загальна довжина в транспортному положенні: ≈ 6500 мм
- Ширина: ≈ 1700 мм (з каркасом панелей)
- Висота в транспортному положенні (шнек складений або горизонтально): ≤ 1800 мм
- Висота в робочому положенні ($\beta=30^\circ$): ≈ 3200 мм
- Маса конструкції (повна):
 $350 \text{ кг} + 60 \text{ кг (панелі та акумулятори)} = 410 \text{ кг}$
- Навантаження на вісь: ≈ 250 кг, що дозволяє буксирувати перевантажувач легковим автомобілем або трактором без спеціального дозволу.

Розрахунок на міцність основних вузлів

					14.17 - КР.040.3.000 ПЗ	Аркуш
						63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вал шнека: Для передачі крутного моменту 100 Н·м при довжині 6 м використовується труба 65×5 мм зі сталі 45. Момент опору перерізу:

$$W = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32 \cdot D} = \frac{3,14(0,065^4 - 0,055^4)}{32 \cdot 0,065}$$

$$W = \frac{3,14 \cdot 8,70 \cdot 10^{-6}}{32 \cdot 0,065} = \frac{2,73 \cdot 10^{-5}}{2,08} = 1,31 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

Напруга кручення:

$$\tau = \frac{M}{W} = \frac{100}{1,31 \cdot 10^{-5}} = 7,63 \cdot 10^6 \text{ Па} = 7,63 \text{ МПа}$$

Допустима напруга для сталі 45 – 25 МПа. Міцність забезпечена з великим запасом.

Стійкість конструкції від перекидання: Проведено розрахунок для вітрового навантаження (за аналогією з п. 5.3 попередньої роботи). При площі панелей 4 м² та швидкості вітру 20 м/с (72 км/год) перекидальний момент становить близько 1200 Н·м, а утримуючий момент від ваги конструкції (410 кг) при ширині колії 1,2 м – близько 2400 Н·м, тому додаткові противітрові опори не потрібні.

Переваги розробленої конструкції

1. Повна автономність – не потребує підключення до електромережі 380 В або дизельного палива.
2. Екологічність – нульові викиди CO₂ та відсутність шуму.
3. Мобільність – може транспортуватися за допомогою будь-якого автомобіля з фаркопом (вага 410 кг).
4. Простота керування – один пульт з регулюванням швидкості.
5. Низька вартість експлуатації – сонячна енергія безкоштовна, акумулятори LiFePO₄ розраховані на 10 років служби.

Недоліки: залежність від погодних умов (але резерв акумулятора 1 доба), вища початкова вартість порівняно з простими електромережевими шнеками (окупається за 2-3 роки за рахунок економії електроенергії).

					14.17 - КР.040.3.000 ПЗ	Аркуш
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У третьому розділі кваліфікаційної роботи на основі виконаних інженерних розрахунків здійснено проєктування основних компонентів мобільного шнекового перевантажувача зерна з електроприводом від сонячної панелі. Отримано наступні результати.

1. Кінематичний розрахунок шнека. Визначено раціональні геометричні параметри гвинтового робочого органу: зовнішній діаметр $D = 220$ мм, діаметр вала $d = 65$ мм, крок гвинта $S = 220$ мм, довжина конвеєра $L = 6$ м, кут нахилу $\beta = 30^\circ$. При частоті обертання $n = 45$ об/хв розрахункова продуктивність складає 4,8 т/год, що відповідає технічним вимогам для фермерських господарств. Критична частота обертання ($n_{кр} \approx 96$ об/хв) значно перевищує робочу, що забезпечує щадне транспортування зерна.

2. Тяговий розрахунок та вибір двигуна. Механічна потужність на валу шнека становить 0,5 кВт. Для її реалізації обрано безщітковий двигун постійного струму (BLDC) потужністю 0,7 кВт, номінальною напругою 48 В та частотою обертання 1500 об/хв. Узгодження частот забезпечує черв'ячний редуктор Ч-63 з передаточним числом $i = 31,5$ та номінальним моментом на вихідному валу 120 Н·м.

3. Розрахунок системи автономного живлення. Добове енергоспоживання при роботі 4 години становить 2,5 кВт·год. Для забезпечення автономії обрано акумуляторну батарею LiFePO₄ загальною ємністю 100 А·год, напругою 48 В (чотири блоки по 12 В, 100 А·год), що гарантує резерв роботи до 1,5 доби без сонячної генерації. Пікова потужність сонячних панелей – 720 Вт (чотири монокристалічні панелі по 180 Вт), загальною площею 3,96 м². МРРТ-контролер на 20 А забезпечує ефективний заряд та стабілізацію напруги. Загальна вартість компонентів енергосистеми – близько 65 500 грн.

					14.17 - КР.040.3.000 ПЗ	Аркуш
						65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

У четвертому розділі кваліфікаційної роботи проведено аналіз небезпечних виробничих факторів, що виникають під час експлуатації мобільного шнекового перевантажувача зерна з електроприводом від сонячних панелей, розроблено заходи з електробезпеки під час роботи з фотоелектричними системами постійного струму та виконано розрахунок стійкості конструкції до перекидання під дією вітрового навантаження.

4.1 Аналіз небезпечних виробничих факторів під час експлуатації мобільних шнекових перевантажувачів

Шнекові перевантажувачі зерна, як і будь-яке сільськогосподарське обладнання, є джерелом потенційної небезпеки для обслуговуючого персоналу. Для розробки ефективних заходів безпеки необхідно ідентифікувати та класифікувати небезпечні та шкідливі виробничі фактори, що виникають під час експлуатації.

Класифікація небезпечних факторів

Згідно з ДСТУ EN ISO 12100:2016 «Безпека машин. Основні принципи конструювання. Оцінювання ризику та зменшення ризику», небезпечні фактори поділяються на механічні, електричні, термічні, шумові, вібраційні, фактори, пов'язані з матеріалами, та ергономічні (таблиця 4.1).

					14.17 - КР.040.4.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 4	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Яцков О.В.						
Перевір.		Дядюра К.О.					66	15
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						

Таблиця 4.1 – Небезпечні виробничі фактори при експлуатації шнекового перевантажувача

Група факторів	Джерело	Можливі наслідки	Ризик
Механічні	Обертний шнек (n=45 об/хв)	Захоплення одягу, кінцівок	Високий
	Рухомі частини привода (редуктор, муфта)	Защемлення, удари	Середній
	Завантажувальна лійка (краї, сітка)	Порізи, забиття	Низький
	Рухомі елементи регулювання кута нахилу	Придавлення	Середній
Електричні	Сонячні панелі (напруга до 37 В пост. струму)	Ураження струмом при порушенні ізоляції	Низький
	Акумулятори 48 В (100 А·год)	Коротке замикання, опіки, пожежа	Середній
	МРРТ-контролер, проводка	Ураження струмом (до 48 В – безпечно, але не виключає іскріння)	Низький
Термічні	Редуктор (нагрів до 60°C)	Опіки при дотику	Низький
	Акумулятори при перевантаженні	Перегрів, займання (термічний розгін)	Середній
Шумові	Робота двигуна, шнека, редуктора (≈80 дБА)	Зниження слуху при тривалому впливі	Середній
Вібраційні	Шнек, редуктор (локальна вібрація)	Вібраційна хвороба (при роботі >4 год/день)	Низький
Пов'язані з матеріалами	Зерновий пил (органічний, вибухонебезпечний)	Алергія, респіраторні захворювання	Середній
	Вологий пил (цвіль)	Алергічні реакції	Низький
Ергономічні	Ручне регулювання кута нахилу	Перенапруження, травми спини	Середній
	Неправильне компонування органів керування	Помилки оператора	Низький

Основні небезпечні зони та способи захисту

Зона завантаження (приймальна лійка) – найбільш небезпечна, оскільки оператор подає зерно вручну або лопатою, наближаючись до обертового шнека. Заходи захисту:

- Встановлення захисної решітки з коміркою не більше 50×50 мм, заблокованої з приводом (при відкритті – зупинка двигуна).
- Заборона подачі зерна руками (тільки совковою лопатою або з вібраційного живильника).
- Попереджувальний напис «Не вмикати без решітки».

Зона привода (двигун, редуктор, муфта) – обертові елементи здатні захопити одяг або волосся.

Заходи:

- Суцільний захисний кожух з металевої сітки (товщина прутка 2 мм, комірка 10 мм) з фіксацією від випадкового зняття.
- Захисне заземлення корпусу двигуна (опір ≤ 4 Ом).
- *Зона вивантаження* – можливе запилення (особливо при вітрі).

Заходи:

- Встановлення пиловідвідного рукава або використання тканинного фільтра на вивантажувальному патрубку.
- Використання респіратора (клас Р3) при роботі в закритому приміщенні.

Вимоги до засобів індивідуального захисту (ЗІЗ)

Для оператора шнекового перевантажувача обов'язковими є:

- Захисні окуляри (закритого типу, ДСТУ EN 166:2017);
- Респіратор класу Р3 (для захисту від зернового пилу, ДСТУ EN 149:2017);
- Рукавички з ПВХ (для запобігання порізам та контакту з пилом);
- Черевики з металевим підноском (захист від падіння предметів);
- Навушники (при рівні шуму >80 дБА, ДСТУ EN 352-1:2019).

					14.17 - КР.040.4.000 ПЗ	Аркуш
						68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 4.2 – Рівні шуму на робочих місцях та допустимі норми

Джерело шуму	Рівень звуку, дБА	Нормативне значення, дБА	Перевищення
Двигун BLDC 0,7 кВт	65	80	Ні
Редуктор черв'ячний	72	80	Ні
Шнек з зерном	78	80	Ні
Сумарний (на відстані 1 м)	≈80	80	Межа
При роботі в закритому приміщенні	до 85	80	+5

При роботі в закритому приміщенні (зернохосовищі) необхідне використання навушників, при роботі на відкритому повітрі – не обов'язково, але рекомендується.

Заходи пожежної безпеки

Оскільки конструкція містить літій-залізо-фосфатні акумулятори та електричне обладнання, а також працює з зерновим пилом (вибухонебезпечним при концентрації $> 50 \text{ г/м}^3$), необхідні наступні заходи:

- Вентиляція акумуляторного відсіку (пасивна, через жалюзі).
- Використання запобіжників постійного струму на кожній батареї (40 А).
- Встановлення автоматичного вогнегасника (порошкового) в блоці живлення.
- Заборона паління та використання відкритого вогню в радіусі 10 м від перевантажувача.
- Наявність вуглекислотного вогнегасника (OU-2) поблизу місця роботи.

4.2 Електробезпека під час роботи з фотоелектричними панелями та акумуляторними батареями в DC-мережах

У проектованому перевантажувачі використовується автономна система електропостачання постійного струму напругою 48 В (сонячні панелі, MPPT-контролер, акумулятори LiFePO_4 , BLDC-двигун). Хоча напруга до 48 В вважається безпечною для людини (за умови сухої шкіри), існують специфічні

					14.17 - КР.040.4.000 ПЗ	Аркуш
						69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ризика, пов'язані з високими струмами, можливістю короткого замикання та особливостями літійових акумуляторів.

Основні вимоги до електробезпеки DC-мереж

Згідно з Правилами безпечної експлуатації електроустановок (НПАОП 0.00-1.01-10) та ДСТУ EN 62109-1:2015 (Безпека силових перетворювачів для фотоелектричних систем), необхідно:

1. Захист від короткого замикання – використання запобіжників постійного струму на кожному струмопровідному контурі. Для акумуляторної батареї 48 В, 100 А·год максимальний струм КЗ може досягати 2000 А (при внутрішньому опорі 0,025 Ом). Тому встановлюються запобіжники класу aR на 50 А (швидкодіючі, розраховані на розрив постійного струму).

2. Ізоляція струмопровідних частин – всі проводи мають бути з подвійною ізоляцією (наприклад, кабель ПВС 2×4 мм²), прокладені в металевих рукавах або пластикових коробах. Клеми акумуляторів закриті кришкою з попереджувальним написом.

3. Захист від перевантаження – МРРТ-контролер має вбудований захист від перевантаження за струмом та температурою. При перевищенні 20 А він автоматично знижує струм заряду.

4. Захист від глибокого розряду – контролер відключає навантаження при напрузі батареї нижче 42 В (для 48-В системи). Це запобігає руйнуванню акумуляторів.

5. Захисне заземлення – всі металеві корпуси (двигун, редуктор, рама) повинні бути з'єднані з шиною заземлення. Оскільки джерело живлення ізольоване від землі (система ІТ за класифікацією ПУЕ), заземлення виконується через окремий заземлювач (див. розрахунок в п. 5.3 попередньої роботи). Опір заземлення ≤ 4 Ом.

Особливості роботи з акумуляторами LiFePO₄

Літій-залізо-фосфатні акумулятори є відносно безпечними, але при порушенні режимів заряду або фізичному пошкодженні можуть виділяти газ та займатися. Вимоги:

					14.17 - КР.040.4.000 ПЗ	Аркуш
						70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Акумулятори розміщуються в герметичному металевому боксі з вентиляційними отворами (для відведення можливих газів).

– Кожен акумулятор має вбудовану плату балансування (BMS – Battery Management System) для контролю напруги та температури окремих банок.

– Забороняється розташовувати акумулятори поблизу джерел тепла (двигун, редуктор) та прямих сонячних променів (температура експлуатації 0...+45 °C).

– При транспортуванні перевантажувача акумулятори повинні бути відключені від навантаження.

Заходи безпеки при роботі з сонячними панелями

Сонячні панелі навіть при відсутності освітлення (вночі) не є небезпечними. Вдень на їхніх клеммах присутня напруга до 37 В (для з'єднання 2S2P). При послідовному з'єднанні панелей (у проєкті – 2S2P, напруга ~37 В) струм досягає 19,5 А. Правила безпеки:

– Перед обслуговуванням панелей (очищення, ремонт) вони повинні бути відключені від контролера (розрив ланцюга постійного струму за допомогою рубильника постійного струму на 32 А).

– Забороняється торкатися контактів панелей руками при вологій погоді.

– Для очищення панелей використовуються неметалеві щітки (пластик, гума).

– Панелі надійно закріплені на каркасі згідно з розрахунком на вітрове навантаження (див. п. 4.3).

Захист від перенапруг та блискавок

Оскільки перевантажувач працює на відкритому повітрі, він може бути вражений блискавкою. Металоконструкція (рама, кожух шнека, каркас панелей) повинна бути з'єднана із заземлювачем (опір ≤ 10 Ом для блискавкозахисту). Окремий блискавковідвід не встановлюється через малі габарити (висота < 3 м).

Інструктаж персоналу

Перед допуском до роботи оператор повинен пройти:

– Вступний інструктаж з охорони праці;

					14.17 - КР.040.4.000 ПЗ	Аркуш
						71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Первинний інструктаж на робочому місці (вивчення інструкції з експлуатації перевантажувача);
- Цільовий інструктаж з електробезпеки (особливості роботи з DC-мережами напругою до 48 В).

Забороняється допуск до роботи осіб, які не досягли 18 років, не пройшли медичний огляд та не мають 1-ї групи допуску з електробезпеки (при роботі з електроустаткуванням до 1000 В).

4.3 Розрахунок стійкості конструкції перевантажувача від перекидання під дією вітрового навантаження

Важливою вимогою безпеки при експлуатації мобільного обладнання з вертикальними панелями є забезпечення стійкості проти перекидання під дією вітру. Проектований перевантажувач має сонячні панелі площею $\approx 4 \text{ м}^2$, встановлені на висоті до 2,2 м над рівнем землі. При сильному вітрі виникає перекидальний момент, який може перевищити утримуючий момент від ваги конструкції.

Вихідні дані для розрахунку

- Загальна маса перевантажувача: $m = 410 \text{ кг}$ (згідно з п. 3.4.2);
- Сила ваги: $G = m \cdot g = 410 \cdot 9,81 = 4022 \text{ Н}$;
- Ширина колії (відстань між колесами): $B = 1,2 \text{ м}$;
- Відстань від центру мас до ребра перекидання (колеса):
 - $b = B/2 = 0,6 \text{ м}$;
- Площа сонячних панелей: $A = 3,96 \text{ м}^2$ (приймаємо 4 м^2 для розрахунку);
- Висота центра парусності (центр панелей) над землею: $h_w = 2,0 \text{ м}$;
- Нормативне вітрове навантаження для III вітрового району України (Одеська область): $q_w = 0,42 \text{ кПа}$ (згідно з ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження і впливи»);

					14.17 - КР.040.4.000 ПЗ	Аркуш
						72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Коефіцієнт аеродинаміки для плоских конструкцій: $c = 1,2$ (для панелей з навітряного боку);

– Коефіцієнт надійності за навантаженням: $\gamma_f = 1,4$ (для вітрового навантаження).

Розрахунок вітрового навантаження.

Розрахункове вітрове навантаження на панелі:

$$F_w = q_w \cdot c \cdot A \cdot \gamma_f = 420 \cdot 1,2 \cdot 4 \cdot 1,4 = 420 \cdot 6,72 = 2822 \text{ Н}$$

Перекидальний момент відносно осі коліс (ребра перекидання):

$$M_{\text{пер}} = F_w \cdot h_w = 2822 \cdot 2,0 = 5644 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Утримуючий момент від ваги конструкції

Утримуючий момент створюється силою ваги, яка діє на плечі $b = 0,6$ м (відстань від центру мас до ребра перекидання). Приймаємо, що центр мас знаходиться на висоті $0,8$ м від землі, але для моменту стійкості важливе горизонтальне плече.

$$M_{\text{утр}} = G \cdot b = 4022 \cdot 0,6 = 2413 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Перевірка умови стійкості

Умова стійкості: $M_{\text{утр}} \geq M_{\text{пер}}$.

В даному випадку $2413 \text{ Н} \cdot \text{м} < 5644 \text{ Н} \cdot \text{м}$, тобто стійкість не забезпечена при вітрі 20 м/с (72 км/год). Це означає, що конструкція може перекинутися при поривах вітру.

Заходи для підвищення стійкості

Для забезпечення стійкості необхідно збільшити утримуючий момент. Це досягається:

1. Збільшення ширини колії – рознесення коліс до $1,8$ м. Тоді плече $b = 0,9$ м, $M_{\text{утр}} = 4022 \cdot 0,9 = 3620 \text{ Н} \cdot \text{м}$ – все ще недостатньо.

2. Збільшення маси конструкції (баластування). Додатковий баласт масою m_6 створює додатковий момент. Розрахуємо необхідний додатковий момент:

					14.17 - КР.040.4.000 ПЗ	Аркуш
						73
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Delta M = M_{\text{пер}} - M_{\text{утр}} = 5644 - 2413 = 3231 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Якщо баласт розташувати в нижній частині рами (на рівні осі коліс, плече $b = 0,6 \text{ м}$), то необхідна додаткова маса:

$$m_6 = \frac{\Delta M}{g \cdot b} = \frac{3231}{9,81 \cdot 0,6} = \frac{3231}{5,886} \approx 549 \text{ кг}$$

Це значно збільшує загальну масу (до 960 кг), що погіршує мобільність. Тому більш раціональним є використання виносних опор (ног).

3. Використання виносних опор – механічні упори, які встановлюються під час роботи (особливо у вітряну погоду). Виносні опори збільшують плече до $b_{\text{оп}} = 1,2 \text{ м}$ (при ширині розносу 2,4 м). Тоді утримуючий момент без баласту:

$$M_{\text{утр}} = 4022 \cdot 1,2 = 4826 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Все ще недостатньо ($5644 > 4826$). Потрібно комбінувати: виносні опори + невеликий баласт ($\approx 100 \text{ кг}$). Приймаємо конструктивне рішення: дві виносні опори (труби $50 \times 50 \times 3 \text{ мм}$) з гвинтовими домкратами, які опускаються на землю перед початком роботи. Вони створюють додаткове плече $b_{\text{оп}} = 1,0 \text{ м}$ (ширина розносу 2,0 м). Тоді сумарний утримуючий момент:

$$M_{\text{утр}} = G \cdot b + G_{\text{оп}} \cdot b_{\text{оп}}$$

де $G_{\text{оп}}$ – додаткова реакція від опор (приймаємо, що опори сприймають половину ваги). Орієнтовно $G_{\text{оп}} \approx 2000 \text{ Н}$. Тоді:

$$M_{\text{утр}} = 4022 \cdot 0,6 + 2000 \cdot 1,0 = 2413 + 2000 = 4413 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Все ще менше 5644. Тому потрібне збільшення баласту.

Остаточне рішення: встановити додатковий баласт 150 кг (наприклад, бетонні блоки) в нижній частині рами між колесами, а також використовувати виносні опори. Тоді:

$$G_{\text{бал}} = 150 \cdot 9,81 = 1472 \text{ Н, плече } b = 0,9 \text{ м}$$

$$M_{\text{утр}} = 4022 \cdot 0,6 + 1472 \cdot 0,9 + 2000 \cdot 1,0 = 2413 + 1325 + 2000 = 5738 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Стійкість забезпечена з запасом

Висновок щодо стійкості

					14.17 - КР.040.4.000 ПЗ	Аркуш
						74
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При експлуатації проектного перевантажувача необхідно дотримуватись наступних правил:

- У вітряну погоду (швидкість вітру > 15 м/с) роботи припиняти, конструкцію складати (панелі можна опустити в горизонтальне положення) або фіксувати до нерухомого об'єкта.
- Перед початком робіт встановлювати виносні опори (входять до комплекту) та перевіряти їх контакт із землею.
- Рекомендується використовувати додатковий баласт (150 кг) для підвищення стійкості.
- Розрахунки виконано для максимальної площі панелей. При зменшенні площі (наприклад, використання 3 панелей) стійкість покращується.

					14.17 - КР.040.4.000 ПЗ	Аркуш
						75
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У четвертому розділі кваліфікаційної роботи проведено аналіз небезпечних виробничих факторів, розроблено заходи з електробезпеки та виконано розрахунок стійкості конструкції мобільного шнекового перевантажувача зерна з електроприводом від сонячних панелей.

1. Аналіз небезпечних виробничих факторів. Ідентифіковано основні небезпеки: механічні (обертний шнек, рухомі частини привода, завантажувальна лійка), електричні (сонячні панелі, акумулятори 48 В, МРРТ-контролер), термічні (нагрів редуктора, перегрів акумуляторів), шумові (до 85 дБА) та фактори, пов'язані з зерновим пилом (алергія, вибухонебезпечність). Розроблено відповідні заходи захисту: захисна решітка на лійці з блокуванням привода, суцільний кожух на приводі, заземлення корпусу двигуна, використання засобів індивідуального захисту (респіратор класу РЗ, захисні окуляри, навушники, рукавички), а також порошковий вогнегасник та вентиляція акумуляторного відсіку.

2. Електробезпека в DC-мережах. Визначено, що основні ризики пов'язані з високими струмами короткого замикання (до 2000 А) та термічним розгоном літійових акумуляторів. Розроблено наступні заходи: застосування швидкодіючих запобіжників постійного струму класу aR на 50 А, подвійна ізоляція проводів, прокладання в металевих рукавах, використання вбудованих BMS-контролерів для кожної батареї (захист від перезаряду, глибокого розряду та перегріву), захисне заземлення металевих корпусів з опором ≤ 4 Ом, а також вимога проведення інструктажу з електробезпеки для персоналу (1-а група допуску).

3. Розрахунок стійкості проти перекидання. При нормативному вітровому навантаженні для III вітрового району України (швидкість вітру 20 м/с) та площі сонячних панелей 4 м², перекидальний момент становить 5644 Н·м. Утримуючий момент від ваги конструкції (410 кг) при ширині колії 1,2 м дорівнює лише 2413 Н·м, що недостатньо. Для забезпечення стійкості запропоновано комбіноване рішення: встановлення виносних опор (збільшують плече до 1,0 м).

					14.17 - КР.040.4.000 ПЗ	Аркуш
						76
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 5

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ

У п'ятому розділі кваліфікаційної роботи виконано розрахунок капітальних витрат на виготовлення автономного шнекового перевантажувача зерна з електроприводом від сонячних панелей, визначено річну економію енергоресурсів порівняно з традиційними аналогами (мережевий електропривод та привод від ВВП трактора) та розраховано основні показники економічної ефективності – термін окупності, чисту приведену вартість (NPV) та рентабельність інвестицій (ROI).

5.1 Капітальні витрати на виготовлення та комплектацію автономної машини

Капітальні витрати включають вартість придбання або виготовлення всіх компонентів машини, а також витрати на монтаж, налагодження та транспортування. Розрахунок виконано в цінах 2026 року для умов півдня України.

Склад та вартість основних компонентів

На основі розрахунків розділу 3 визначено наступні основні вузли та їх вартість (таблиця 5.1).

Загальна сума капітальних вкладень становить 125 000 грн. Ця сума включає всі витрати на виготовлення, комплектацію та пусконаладження автономного перевантажувача.

					14.17 - КР.040.5.000 ПЗ						
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Яцков О.В.			РОЗДІЛ 5			Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К.О.								77	7
Реценз.											
Н. Контр.											
Затверд.		Дядюра К. О.									

Таблиця 5.1 – Капітальні витрати на виготовлення автономного шнекового перевантажувача

№	Найменування	Кількість	Ціна за од., грн	Сума, грн
1	2	3	4	5
1. Механічна частина				
1.1	Кожух шнека (труба 230×2 мм, довж. 6 м, оцинк. сталь)	1 шт.	4 500	4 500
1.2	Шнек (вал 65×5 мм, витки зі сталі 65Г)	1 шт.	8 200	8 200
1.3	Завантажувальна лійка з сіткою (сталь 2 мм)	1 шт.	2 800	2 800
1.4	Вивантажувальний патрубков (поворотний)	1 шт.	1 200	1 200
1.5	Рама зварна (профіль 100×50×4 мм)	1 шт.	6 500	6 500
1.6	Колеса пневматичні (діам. 400 мм) з гальмами	2 шт.	2 200	4 400
1.7	Вісь та маточини	1 компл.	2 500	2 500
1.8	Гідравлічний домкрат (або гвинтовий) для регулювання кута	1 шт.	3 800	3 800
1.9	Виносні опори (2 шт.)	1 компл.	1 500	1 500
1.10	Баласт (чавунні плити 150 кг)	1 компл.	2 400	2 400
Разом механічна частина				37 800
Привод та електрообладнання				
2.1	BLDC-двигун 0,7 кВт, 48 В	1 шт.	6 500	6 500
2.2	Черв'ячний редуктор Ч-63, і=31,5	1 шт.	5 200	5 200
2.3	Муфта з'єднувальна	1 шт.	800	800
2.4	MPPT-контролер Epever Tracer 4215AN (20 А)	1 шт.	4 500	4 500
2.5	Акумулятор LiFePO ₄ 12 В 100 А·год	4 шт.	8 500	34 000
2.6	Сонячна панель 180 Вт (монокристал)	4 шт.	3 200	12 800
2.7	Каркас для панелей (алюміній)	1 шт.	4 200	4 200
2.8	Проводи, клеми, запобіжники, рубильник	1 компл.	2 500	2 500
2.9	Блок керування (бокс IP65, пульт)	1 шт.	1 800	1 800
Разом привод та електрообладнання				72 300

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	14.17 - КР.040.5.000 ПЗ	Аркуш
						78

№	Найменування	Кількість	Ціна за од., грн	Сума, грн
1	2	3	4	5
Монтаж, налагодження, транспортування				
3.1	Зварювальні та складальні роботи	—	8 000	8 000
3.2	Електромонтаж та налагодження системи	—	4 500	4 500
3.3	Транспортування (доставка до господарства)	—	2 500	2 500
Разом монтаж та інші				15 000
ВСЬОГО капітальних витрат (округлено)				125 000

Для порівняння: придбання серійного мережевого шнека аналогічної продуктивності (наприклад, «Технік» ШПЗ-30) коштує близько 45 000 грн, однак до нього потрібно додати витрати на підведення трифазної мережі (якщо її немає) або придбання дизельного генератора. Таким чином, початкові інвестиції в автономну машину є вищими, але експлуатаційні витрати – значно нижчими.

5.2 Розрахунок економії паливно-мастильних матеріалів та енергетичних ресурсів

Розрахунок економії виконується порівнянням експлуатаційних витрат при використанні традиційних аналогів (живлення від трифазної електромережі 380 В та привод від ВВП трактора) з витратами на обслуговування автономної сонячної системи.

Режими роботи та річне навантаження

Для фермерського господарства з площею посівів 500 га та річним валовим збором зерна ≈ 1500 т, типовий річний обсяг перевантажувальних робіт (завантаження вантажівок, формування буртів, подача на сушку) становить близько **3000 тонн** (враховуючи повторні перевантаження). При продуктивності шнека 5 т/год, річний час роботи:

					14.17 - КР.040.5.000 ПЗ	Аркуш
						79
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$T_{\text{річ}} = \frac{3000}{5} = 600 \text{ годин}$$

Витрати при використанні традиційного мережевого електропривода

Мережевий шнек з електродвигуном потужністю 4 кВт (для продуктивності 5 т/год) споживає за рік:

$$E_{\text{мережа}} = 4 \text{ кВт} \cdot 600 \text{ год} = 2400 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Тариф на електроенергію для сільськогосподарських підприємств (II клас напруги) станом на 2026 рік становить $\approx 4,50$ грн/кВт·год (з ПДВ). Річні витрати:

$$C_{\text{мережа}} = 2400 \cdot 4,50 = 10\,800 \text{ грн}$$

Додатково необхідно враховувати плату за приєднану потужність (≈ 500 грн/рік) та амортизацію кабельної лінії (≈ 300 грн/рік). Отже, загальні річні витрати на електроенергію та інфраструктуру $\approx 11\,600$ грн.

Витрати при використанні привода від ВВП трактора

При використанні шнека з приводом від вала відбору потужності трактора (замість електродвигуна) використовується трактор потужністю 50 к.с. (наприклад, МТЗ-82). Витрата дизельного палива при роботі на ВВП (максимальне навантаження) становить ≈ 6 л/год. Ціна дизельного палива в Україні (2026 р.) – **58 грн/л**. Річні витрати на паливо:

$$C_{\text{паливо}} = 600 \text{ год} \cdot 6 \text{ л/год} \cdot 58 \text{ грн/л} = 208\,800 \text{ грн}$$

Додатково враховуються витрати на технічне обслуговування трактора (заміна масла, фільтрів, ремонт) – близько 20% від вартості палива, тобто $\approx 41\,800$ грн. Разом $\approx 250\,600$ грн/рік. Цей варіант є найбільш витратним.

Витрати при використанні автономного сонячного електропривода

Для розробленого автономного перевантажувача основні експлуатаційні витрати включають:

- Заряд акумуляторів – сонячна енергія безкоштовна.
- Заміна акумуляторів – ресурс LiFePO_4 становить ≈ 3000 циклів заряд-розряд. При роботі 600 годин на рік та ємності, достатній для 4 годин роботи без сонця, кількість циклів ≈ 150 на рік. Термін служби акумуляторів – 20 років.

					14.17 - КР.040.5.000 ПЗ	Аркуш
						80
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Однак для консервативного розрахунку приймаємо, що за 10 років акумулятори вимагають заміни. Тобто щорічні амортизаційні відрахування на акумулятори:

$$A_{\text{ак}} = \frac{34\,000}{10} = 3\,400 \text{ грн/рік}$$

– Технічне обслуговування (миття панелей, перевірка контактів, змащення редуктора) – $\approx 2\,000$ грн/рік.

– Ремонт (заміна підшипників, муфт тощо) – $\approx 1\,500$ грн/рік.

– Амортизація інших компонентів (двигун, контролер, панелі) – термін служби 10-15 років, приймаємо 10 років для спрощення. Вартість цих компонентів (без акумуляторів): 6 500 (двигун) + 4 500 (контролер) + 12 800 (панелі) + 4 200 (каркас) + 1 800 (бокс) = 29 800 грн. Річна амортизація:

$$A_{\text{інші}} = \frac{29\,800}{10} = 2\,980 \text{ грн/рік}$$

Загальні річні експлуатаційні витрати для автономного варіанту:

$$C_{\text{авт}} = A_{\text{ак}} + A_{\text{інші}} + \text{ТО} + \text{ремонт} = 3\,400 + 2\,980 + 2\,000 + 1\,500 = 9\,880 \text{ грн/рік}$$

Річна економія порівняно з аналогами

Економія порівняно з мережевим електроприводом:

$$E_{\text{мережа}} = C_{\text{мережа}} - C_{\text{авт}} = 11\,600 - 9\,880 = 1\,720 \text{ грн/рік}$$

Економія порівняно з приводом від ВВП трактора:

$$E_{\text{ВВП}} = C_{\text{ВВП}} - C_{\text{авт}} = 250\,600 - 9\,880 = 240\,720 \text{ грн/рік}$$

Оскільки в господарствах найчастіше застосовують мережеві шнеки (за наявності трифазної мережі на току), далі для розрахунку економічної ефективності використовуємо консервативний варіант порівняння з мережевим аналогом – економія 1 720 грн/рік. Однак для господарств, які використовують тракторний привід, економія буде набагато більшою (240 720 грн/рік), що робить проєкт надзвичайно вигідним.

					14.17 - КР.040.5.000 ПЗ	Аркуш
						81
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додаткова економія за рахунок зниження втрат зерна

Автономний перевантажувач може працювати безперервно під час збирання врожаю, що зменшує простої комбайнів в очікуванні транспортування зерна. Орієнтовне зниження втрат зерна (за рахунок своєчасного перевантаження) може становити 0,5% від валового збору. При врожаї 1500 т це 7,5 т зерна. Ціна пшениці $\approx 6\,500$ грн/т, додатковий дохід $\approx 48\,750$ грн/рік. Але цей ефект не враховуємо в основному розрахунку (як непрямий).

5.3 Визначення показників економічної ефективності та терміну окупності проєкту

На основі капітальних витрат (125 000 грн) та річної економії (1 720 грн при порівнянні з мережевим аналогом) розрахуємо основні показники.

Простий термін окупності (Payback Period, PP)

$$PP = \frac{I}{E} = \frac{125\,000}{1\,720} \approx 72,7 \text{ року}$$

Такий термін окупності є неприйнятним. Однак це пояснюється тим, що порівняння з мережевим шнеком не відображає реальної ситуації, оскільки мережевий шнек потребує наявності трифазної мережі. Якщо у господарстві мережі немає (або її підведення коштує дорого), порівняння слід вести з дизельним приводом або з придбанням генератора.

Альтернативний сценарій: Для господарства без трифазної мережі варіанти:

- Купівля дизельного генератора (10 кВт) вартістю $\approx 30\,000$ грн + витрати на паливо 208 800 грн/рік.
- Або використання трактора на ВВП (витрати 250 600 грн/рік).
- Або купівля автономного шнека за 125 000 грн з безкоштовною сонячною енергією.

У такому випадку річна економія порівняно з тракторним приводом становить 240 720 грн. Тоді термін окупності:

					14.17 - КР.040.5.000 ПЗ	Аркуш
						82
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$PP = \frac{125\,000}{240\,720} \approx 0,52 \text{ року} \approx 6,2 \text{ місяця}$$

Це дуже хороший показник.

Реалістичний сценарій (враховує, що частина робіт виконується від мережі, частина – в полі без мережі). Прийнемо, що 50% обсягу перевантажень (1500 т) виконуються в місцях без мережі, де використовується тракторний привід. Економія на цій частині: $1500 / 5 = 300 \text{ год} \times (208\,800/600) \approx 300 \times 348 = 104\,400 \text{ грн/рік}$. Решта 1500 т – мережевий шнек, економія мінімальна. Сумарна економія $\approx 104\,400 + 860 \text{ (50\% від } 1\,720) \approx 105\,260 \text{ грн/рік}$. Тоді:

$$PP = \frac{125\,000}{105\,260} \approx 1,19 \text{ року} \approx 14 \text{ місяців}$$

Для подальших розрахунків візьмемо **річну економію 100 000 грн** (середньо-консервативний варіант).

Чиста приведена вартість (Net Present Value, NPV)

Розрахунок виконаємо на 5 років при ставці дисконту $r = 12\%$. Річний чистий грошовий потік $CF = 100\,000 \text{ грн}$. Початкові інвестиції $I = 125\,000 \text{ грн}$.

$$NPV = \sum_{t=1}^5 \frac{CF_t}{(1+r)^t} - I = 100\,000 \cdot \frac{1 - (1,12)^{-5}}{0,12} - 125\,000$$

Коефіцієнт дисконтування анuitету:

$$\frac{1 - (1,12)^{-5}}{0,12} = \frac{1 - 0,5674}{0,12} = \frac{0,4326}{0,12} = 3,605$$

$$NPV = 100\,000 \cdot 3,605 - 125\,000 = 360\,500 - 125\,000 = 235\,500 \text{ грн}$$

Оскільки $NPV > 0$, проєкт є доцільним.

Внутрішня норма рентабельності (Internal Rate of Return, IRR)

IRR – ставка дисконту, при якій $NPV = 0$. Для нашого випадку (анuitет):

$$CF \cdot \frac{1 - (1 + IRR)^{-5}}{IRR} = I$$

$$100\,000 \cdot \frac{1 - (1 + IRR)^{-5}}{IRR} = 125\,000$$

					14.17 - КР.040.5.000 ПЗ	Аркуш
						83
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\frac{1 - (1 + IRR)^{-5}}{IRR} = 1,25$$

Підбором: при $IRR = 0,75$ (75%) коефіцієнт $\approx 1,38$; при $IRR = 0,85$ (85%) $\approx 1,28$; при $IRR = 0,92$ (92%) $\approx 1,24$. Отже, $IRR \approx 85\%$. Це значно вище за ставку дисконту 12%, що свідчить про високу ефективність.

Рентабельність інвестицій (Return on Investment, ROI)

$$ROI = \frac{CF}{I} \cdot 100\% = \frac{100\,000}{125\,000} \cdot 100\% = 80\% \text{ на рік}$$

Індекс прибутковості (Profitability Index, PI)

$$PI = \frac{NPV + I}{I} = \frac{235\,500 + 125\,000}{125\,000} = \frac{360\,500}{125\,000} = 2,88$$

Проект є прибутковим, оскільки $PI > 1$.

Аналіз чутливості

Зміна вартості акумуляторів (найбільш дорогий компонент) на $\pm 20\%$ впливає на капітальні витрати на $\pm 6\,800$ грн, що змінює термін окупності на $\pm 0,5$ місяця. Зміна ціни дизпалива (для сценарію з тракторним приводом) значно впливає на економію. При зниженні ціни дизпалива до 45 грн/л економія зменшиться на 22%, але все одно залишається високою (таблиця 5.2).

Таблиця 5.2 – Зведені показники економічної ефективності

Показник	Значення	Одиниця
Капітальні витрати	125 000	грн
Річна економія (реалістичний сценарій)	100 000	грн/рік
Простий термін окупності	1,19	року (≈ 14 міс.)
NPV (при $r=12\%$, 5 років)	235 500	грн
IRR	≈ 85	%
ROI	80	%
PI	2,88	—

Капітальні витрати на виготовлення та комплектацію автономного шнекового перевантажувача становлять 125 000 грн. Основну частку витрат

складають акумулятори LiFePO₄ (34 000 грн), сонячні панелі (12 800 грн), механічна частина (37 800 грн) та привод з електрообладнанням (72 300 грн).

Річна економія залежить від умов використання. При порівнянні з традиційним мережевим електроприводом економія становить лише 1 720 грн/рік, що пояснюється низькими витратами на електроенергію. Однак для господарств, які не мають доступу до трифазної мережі та використовують тракторний привід або дизельний генератор, річна економія сягає 240 720 грн. Реалістичний сценарій (50% робіт в полі без мережі) дає економію 100 000 грн/рік. Термін окупності при реалістичному сценарії становить 1,19 року (≈ 14 місяців), що є прийнятним для сільськогосподарської техніки. Чиста приведена вартість (NPV) за 5 років – 235 500 грн, внутрішня норма рентабельності (IRR) – 85%, рентабельність інвестицій (ROI) – 80% на рік. Усі показники підтверджують економічну доцільність впровадження автономного шнекового перевантажувача.

Рекомендації: Проєкт особливо вигідний для господарств, які не мають стаціонарної трифазної мережі на токах або в полях. Автономний перевантажувач забезпечує повну незалежність від дизельного палива та мережі, знижує експлуатаційні витрати та викиди CO₂. При наявності мережі економічний ефект менший, але додаткові переваги (мобільність, екологічність) можуть бути вирішальними при виборі.

					14.17 - КР.040.5.000 ПЗ	Аркуш
						85
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У п'ятому розділі кваліфікаційної роботи виконано техніко-економічне обґрунтування впровадження автономного шнекового перевантажувача зерна з електроприводом від сонячних панелей. На основі проведених розрахунків зроблено наступні висновки.

1. Капітальні витрати на виготовлення та комплектацію машини становлять 125 000 грн. Основну частку витрат складають акумуляторна батарея LiFePO₄ 48 В, 100 А·год (34 000 грн), сонячні панелі потужністю 720 Вт (12 800 грн), механічна частина (шнек, кожух, рама, колеса – 37 800 грн) та привод з електрообладнанням (двигун, редуктор, контролер – 72 300 грн). Витрати на монтаж та налагодження становлять 15 000 грн.

2. Річна економія експлуатаційних витрат суттєво залежить від умов використання:

- при порівнянні з мережевим електроприводом (380 В) – 1 720 грн/рік;
- при порівнянні з приводом від ВВП трактора – 240 720 грн/рік;
- при реалістичному сценарії (50% робіт поза мережею) – 100 000 грн/рік.

3. Показники економічної ефективності (при реалістичному сценарії):

- простий термін окупності – 1,19 року (≈ 14 місяців);
- чиста приведена вартість (NPV) за 5 років при ставці дисконту 12% – 235 500 грн;

- внутрішня норма рентабельності (IRR) – $\approx 85\%$;
- рентабельність інвестицій (ROI) – 80% на рік;
- індекс прибутковості (PI) – 2,88.

Усі розраховані показники підтверджують економічну доцільність впровадження автономного перевантажувача, особливо для господарств, які не мають доступу до трифазної електромережі. Проєкт забезпечує повну енергетичну незалежність, відсутність витрат на дизельне паливо та мінімальні витрати на обслуговування.

					14.17 - КР.040.5.000 ПЗ	Аркуш
						86
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі виконано теоретичне обґрунтування, інженерне проектування та техніко-економічний аналіз автономного шнекового перевантажувача зерна з електроприводом від сонячних панелей. На основі проведених досліджень та розрахунків сформульовано наступні основні висновки.

1. Аналіз сучасного стану технологій перевантаження зерна. Встановлено, що серед усіх типів перевантажувального обладнання найбільшого поширення для мобільного застосування набули гвинтові (шнекові) конвеєри завдяки простоті конструкції, герметичності, здатності працювати під кутом до 45° та помірному травмуванню зерна. Провідними виробниками є WESTFIELD (Канада), CanAGRO (Німеччина), POFER (Італія), а також українські «Технік» та Agro Build. Основним недоліком існуючих моделей є залежність від стаціонарної трифазної мережі 380 В або від дизельного палива при використанні привода від ВВП трактора. Виконаний огляд автономних фотоелектричних систем підтвердив перспективність їх інтеграції в мобільні сільськогосподарські машини завдяки високій сонячній інсоляції в Україні ($1200\text{--}1400\text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^2$ на рік на півдні) та зниженню вартості літєвих акумуляторів.

2. Фізико-механічні властивості зерна. Визначено розрахункові параметри для проектного шнека: насипна густина пшениці $780\text{ кг}/\text{м}^3$, кут тертя об сталь 22° , коефіцієнт заповнення 0,35, кут природного укусу 28° . Встановлено, що підвищення вологості зерна призводить до зростання коефіцієнта тертя на 30–50%, що необхідно враховувати при виборі запасу потужності двигуна. Рекомендована частота обертання шнека для забезпечення мінімального травмування зерна становить 40–60 об/хв при діаметрі 200–220 мм.

					14.17 - КР.040.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВИСНОВКИ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Яцков О.В.						
Перевір.		Дядюра К.О.					87	3
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К.О.						

3. Математичне моделювання та теоретичне обґрунтування. Розроблено аналітичні залежності для визначення продуктивності шнека та потужності на валу. Для обраних параметрів ($D=220$ мм, $S=220$ мм, $L=6$ м, $\beta=30^\circ$, $n=45$ об/хв) розрахована продуктивність 4,8 т/год та механічна потужність на валу 0,5 кВт. Складено енергетичний баланс системи «фотоелектрична панель – акумулятор – електродвигун». Добове енергоспоживання при роботі 4 години становить 2,5 кВт·год, що забезпечується акумулятором LiFePO_4 48 В, 100 А·год (резерв 1,5 доби) та сонячними панелями потужністю 720 Вт (4×180 Вт). Обґрунтовано використання MPPT-контролера на 20 А та BLDC-двигуна 0,7 кВт, 48 В. Теоретично доведено, що буферний акумулятор усуває розстроювання параметрів електропривода при коливаннях освітленості.

4. Інженерні розрахунки та проєктування. Визначено остаточні геометричні параметри шнека: зовнішній діаметр 220 мм, діаметр вала 65 мм, крок 220 мм, довжина 6 м. Вибрано BLDC-двигун потужністю 0,7 кВт, 48 В, 1500 об/хв та черв'ячний редуктор Ч-63 з передаточним числом 31,5. Розраховано систему електропостачання: чотири акумулятори LiFePO_4 12 В, 100 А·год (послідовно $\rightarrow$ 48 В), чотири сонячні панелі 180 Вт (з'єднання 2S2P), MPPT-контролер 20 А. Загальна площа панелей 3,96 м², маса всієї конструкції 410 кг. Розроблено 3D-модель у SolidWorks, виконано компонування вузлів. Перевірочні розрахунки підтвердили міцність вала шнека (напруга кручення 7,6 МПа при допустимій 25 МПа) та достатню стійкість конструкції після встановлення виносних опор та баласту 150 кг.

5. Охорона праці та безпека життєдіяльності. Проведено ідентифікацію небезпечних виробничих факторів: механічні (обертний шнек, привод), електричні (акумулятори 48 В, струми КЗ до 2000 А), шумові (до 85 дБА), пов'язані з зерновим пилом. Розроблено заходи захисту: захисна решітка з блокуванням, суцільний кожух приводу, запобіжники постійного струму класу aR на 50 А, подвійна ізоляція проводів, захисне заземлення з опором ≤ 4 Ом, використання ЗІЗ (респіратор РЗ, окуляри, навушники).

					14.17 - КР.040.0.000 ПЗ	Аркуш
						88
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6. Техніко-економічна ефективність. Капітальні витрати на виготовлення та комплектацію автономного перевантажувача становлять 125 000 грн. При реалістичному сценарії використання (50% робіт поза трифазною мережею) річна економія порівняно з традиційними аналогами сягає 100 000 грн. Простий термін окупності – 1,19 року (≈ 14 місяців). Чиста приведена вартість (NPV) за 5 років при ставці дисконту 12% – 235 500 грн, внутрішня норма рентабельності (IRR) – 85%, рентабельність інвестицій (ROI) – 80% на рік. Усі показники підтверджують високу економічну доцільність впровадження, особливо для господарств, які не мають доступу до стаціонарної трифазної мережі.

Загальний висновок. Розроблений автономний шнековий перевантажувач зерна з електроприводом від сонячних панелей є технічно реалізовним, екологічно безпечним (нульові викиди CO₂) та економічно ефективним. Він забезпечує повну енергетичну незалежність, мобільність, низькі експлуатаційні витрати та швидку окупність. Проєкт може бути рекомендований до впровадження у фермерських господарствах південних регіонів України з високою сонячною інсоляцією, а також у віддалених районах без доступу до електромережі.

					14.17 - КР.040.0.000 ПЗ	Аркуш
						89
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гевко Р. Б., Ткаченко І. Г., Рогатинський Р. М. Гвинтові конвеєри: теорія, конструкція, розрахунок : монографія. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2021. 312 с.
2. Мазоренко Д. І., Шквиря М. Г., Манько В. П. Сільськогосподарські машини: теорія, конструкція, розрахунок : підручник. Харків : ХНТУСГ, 2021. 480 с.
3. Григор'єв А. Л., Гриньов В. М. Механізація навантажувально-розвантажувальних робіт у сільському господарстві : навчальний посібник. Київ : Урожай, 2019. 312 с.
4. ДСТУ 2240-93. Конвеєри гвинтові. Методи розрахунку. [Чинний від 1994-07-01]. Київ : Держстандарт України, 1994. 18 с.
5. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. [Чинний від 2016-07-01]. Київ : УкрНДНЦ, 2016. 16 с.
6. ISO 7119:1981. Continuous mechanical handling equipment for loose bulk materials – Screw conveyors – Design rules for drive power. [Effective from 1981-11-01]. Geneva : International Organization for Standardization, 1981. 12 p.
7. Рогатинський Р. М., Ляшук О. Л., Смолінський Ю. О. Теоретичні дослідження процесу транспортування сипких матеріалів гвинтовими конвеєрами. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2020. № 210. С. 152–158.
8. Клендій М., Рогатинський Р., Швець Л. Визначення крутного моменту на приводному валу гвинтового конвеєра. *Вісник Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя*. 2025. Т. 119, № 3. С. 45–52.

					14.17 - КР.040.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Яцков О.В.					90	2
Перевір.		Дядюра К.О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К.О.						

9. Hevko R. B., Tkachenko I. G. Mathematical modeling of the screw conveyor efficiency taking into account the physical and mechanical properties of bulk materials. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2020. Vol. 62, No. 3. P. 45–54.

10. Marangon B. B., Silva R. B., Santos L. R. Screw conveyors for grain handling: a review of design parameters and energy efficiency. *Engenharia Agrícola*. 2021. Vol. 41, No. 2. P. 213–222.

11. Stępień B. Energy consumption of a screw conveyor for bulk materials depending on the rotational speed and the filling degree. *Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 23, No. 4. P. 65–74.

12. Roberts A. W. Design and performance considerations for screw conveyors. *Bulk Solids Handling*. 2018. Vol. 38, No. 4. P. 42–51.

13. Al-Mahmood A. R., Al-Kayiem H. H., Gilani S. I. U. H. Feasibility study of a solar-powered screw conveyor for agricultural applications. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021. Vol. 28, 101562. DOI: 10.1016/j.csite.2021.101562.

14. Eltawil M. A., Azam M. M., Al-Mulla Y. A. Solar energy utilization in agricultural machinery: a review of photovoltaic-powered systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 157, 112034. DOI: 10.1016/j.rser.2021.112034.

15. Ghafoor A., Munir A. Design and economics analysis of a solar photovoltaic-powered grain handling system. *Energy for Sustainable Development*. 2020. Vol. 58. P. 12–24. DOI: 10.1016/j.esd.2020.07.005.

16. НПАОП 0.00-1.01-10. Правила охорони праці у сільськогосподарському виробництві : затв. наказом Держгірпромнагляду України від 12.01.2010 № 5. Київ, 2010. 210 с.

17. ДСТУ EN ISO 12100:2016. Безпека машин. Основні принципи конструювання. Оцінювання ризику та зменшення ризику (ISO 12100:2010, IDT). [Чинний від 2017-07-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 98 с.

18. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. [Чинний від 2007-01-01]. Київ : Мінбуд України, 2006. 78 с.

					14.17 - КР.040.5.000 ПЗ	Аркуш
						91
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		