

Центральноукраїнський національний технічний університет
Агротехнічний факультет
Кафедра сільськогосподарського машинобудування

“Допущено до захисту”

зав. кафедрою СГМ

к.т.н., професор

_____Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ

“___” _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти
на тему:

Модернізація сівалки VESTA 8 PROFI з розробкою туковисівного
апарату

Виконав здобувач вищої освіти IV
курсу, групи ГМ-22-1

ОПП «Галузеве машинобудування»

спеціальності 133 «Галузеве
машинобудування»

_____ Килимниченко Ігор Вікторович

«___» _____ 2026 р.

Керівник проекту

доц., канд. техн. наук

_____ Дмитро БОГАТИРЬОВ

«___» _____ 2026 р.

Рецензент

доц., канд. техн. наук

_____ Максим ГОДУНКО

«___» _____ 2026 р.

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет Агротехнічний

Кафедра Сільськогосподарського машинобудування

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський) рівень

Галузь знань 13 «Механічна інженерія»

Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»

Освітньо-професійна програма «Галузеве машинобудування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ

« » 2026 року

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ**

ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Килимниченко Ігор Вікторович

1. Тема роботи: «Модернізація сівалки VESTA 8 PROFI з розробкою туковисівного апарату»
2. Керівник роботи Богатирьов Д.В., к.т.н., доцент
3. Строк подання студентом роботи до захисту 05.06.2026
4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи модернізація сівалки VESTA 8 PROFI, яка в цілому направлена на підвищення продуктивності і якості процесу посіву, особливо внесення туків.
5. Перелік графічного матеріалу 1. Сівалка – складальне креслення; 2. Сошник – складальне креслення; 3. Деталювання.
Всього 3 аркуші формату А1.

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1-6	Богатирьов Д.В., доцент, к.т.н.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Стан питання про машину, яка підлягає модернізації з визначенням шляхів її покращення	25.05.26 р.	
2	Конструкторська частина	30.05.26 р.	
3.	Виконання графічної частини	05.06.26	
4.	Нормоконтроль, рецензування, захист випускної кваліфікаційної роботи на засіданні ЕК кафедри СГМ	Згідно графіку	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2026 р.

Підпис керівника

_____ Богатирьов Д.В.
(прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2026 р.

Підпис здобувача

_____ Килимниченко І.В.
(прізвище та ініціали)

ВСТУП

У межах глобальної трансформації сучасних технологій точного землеробства та переходу до парадигми прецизійного агровиробництва пріоритетним вектором агроінженерного розвитку є системне вдосконалення технічних засобів дозування та внесення макро- і мікроелементів. Ці засоби здійснюють критично важливу технологічну операцію — дозоване, дискретно-неперервне і просторово оптимізоване розміщення мінеральних добрив (туків) у ґрунтовому середовищі одночасно з сівбою, що має виконуватися з обов'язковим урахуванням локальних біофізичних, агрохімічних та структурно-механічних властивостей ґрунтів. Підвищення функціональної адаптивності туковисівних систем посівних машин до просторово-часової гетерогенності умов експлуатації та мінливого агрофізичного фону є вирішальним чинником для забезпечення збалансованого живлення культурних рослин на початкових етапах вегетації, інтенсифікації розвитку кореневої системи та досягнення високих біопродуктивних показників посівних площ в умовах сучасних кліматичних викликів.

Серед вітчизняних технічних засобів просапного типу особливої уваги в аграрному секторі заслуговує пневматична сівалка точного висіву VESTA 8 PROFI виробництва ПАТ «Ельворті» (до 2016 р. — ПАТ «Червона зірка»), яка характеризується високим ступенем технологічної інтеграції, конструктивною збалансованістю та широкою агротехнічною універсальністю. Проте тривала експлуатаційна практика у різноманітних ґрунтово-кліматичних зонах засвідчує, що функціонально-структурна реалізація існуючих робочих органів, зокрема туковисівних апаратів, потребує глибоких оптимізаційних заходів. Саме туковисівна система безпосередньо детермінує стабільність та рівномірність розподілу хімічно

					ВЕСТА 00.000 ПЗ								
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата									
Розроб.	Килимниченко				Пояснювальна записка				Літ.	Аркуш	Аркушів		
Перевір.	Богатирьов										5	40	
Н. контр.	Артеменко								ЦНТУ, гр. ГМ-22-1				
Затв.	Васильковський												

агресивних сипучих матеріалів, ліквідацію пульсації потоку туків між рядками, а також мінімізацію травмування гранул добрив. Недоліки в геометрії дозуючих елементів, металоємності, корозійній стійкості та динаміці взаємодії серійних катушково-штифтових апаратів з добривами мінливої вологості призводять до нерівномірності їх внесення, перевитрати дорогих туків або, навпаки, локального хімічного токсикозу рослин, що істотно знижує загальну технологічну й енергетичну ефективність посівного процесу.

Зважаючи на зазначене, модернізація туковисівного апарату з позицій підвищення техніко-експлуатаційних і технологічних показників розглядається як складне науково-технічне завдання. Воно охоплює параметричний синтез нових конструктивних рішень на основі розрахунків механіки деформівного твердого тіла, аналізу реологічних та трибологічних процесів у зоні безпосереднього контакту дозуючих органів із сипучим дисперсним середовищем мінеральних добрив, а також математичного моделювання процесів динаміки приводу висівних систем у реальних польових умовах. Необхідність забезпечення стабільних агрономічних показників за умов прогресуючих змін клімату, стрімке підвищення вартості мінеральних добрив та жорсткі обмеження ресурсної бази формують стійку потребу у вдосконаленні сільськогосподарських машин відповідно до передових концепцій інтелектуального рослинництва, що й обумовлює високу актуальність теми кваліфікаційної роботи.

Мета кваліфікаційної роботи. Розроблення та обґрунтування комплексу інженерно-технічних рішень з модернізації пневматичної сівалки VESTA 8 PROFI шляхом удосконалення геометричних, кінематичних та функціональних характеристик туковисівного апарату, що забезпечить підвищення адаптивності, надійності, точності дозування та якості технологічного процесу одночасного внесення мінеральних добрив під час посіву просапних культур.

					ВЕСТА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		6

2. СТАН ПИТАННЯ ПРО МАШИНУ, ЯКА ПІДЛЯГАЄ МОДЕРНІЗАЦІЇ

2.1. Аналітичний огляд розвитку туковисівних механічних апаратів шнекового типу

Ефективність сучасних технологій точного землеробства та прецизійного агровиробництва безпосередньо детермінується точністю локального внесення мінеральних добрив (туків) одночасно з сівбою просапних культур.¹ Просапні культури, зокрема кукурудза, соняшник та соя, є надзвичайно чутливими до стартового живлення, оскільки закономірна оптимізація просторового розподілу мікро- та макроелементів у зоні кореневої системи на початкових етапах вегетації визначає темпи росту та загальний біопродуктивний потенціал посівних площ.² Будь-яка нерівномірність внесення добрив, спричєна недосконалістю дозуючих систем, призводить або до локального хімічного токсикозу (опіку) кореневої системи рослин, або до суттєвого недоживлення сходів, що безпосередньо знижує врожайність.¹ Протягом останніх десятиліть технічні засоби дозування еволюціонували від найпростіших гравітаційних заслінок до високоточних мехатронних гвинтових (шнекових) апаратів.³

2.1.1. Ретроспективний аналіз та історичні етапи розвитку тукодозуючих систем

Початкові етапи механізації процесу внесення мінеральних добрив характеризувалися використанням простих гравітаційних дозаторів із заслінками змінного перерізу. Ці системи працювали виключно под дією сили тяжіння, де регулювання норми подачі здійснювалося переміщенням заслінки, що перекривала вихідний отвір бункера.¹ Основним недоліком таких систем була висока закономірна залежність агротехнічних показників від фізико-механічних властивостей добрив (гранулометричного складу, сипучості та вологості). За умов найменшого підвищення вологості відбувалося злежування матеріалу, утворення склепінь у бункері та повне припинення подачі добрив.¹

Для розпушення та примусового виштовхування туків у конструкцію дозаторів почали інтегрувати зірчасті колеса (зірчасто-дискові апарати) та горизонтальні зубчасті ротори.¹ Вони дещо стабілізували процес дозування, проте мали високу металомісткість, швидко зношувалися під дією абразивних і хімічно агресивних мінеральних добрив та спричиняли значне пошкодження (травмування) гранул.³

					ВЕСТА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		7

Справжнім інженерним проривом у тукодозуванні стало впровадження гвинтових (шнекових) висівних апаратів.² Шнекові дозатори належать до апаратів позитивного зміщення, де переміщення матеріалу здійснюється примусово вздовж осі обертання гвинтової навивки у закритому циліндричному кожусі.² Завдяки конструктивній простоті, надійності та здатності працювати з матеріалами різної якості, шнекові апарати зайняли домінуюче положення в сільськогосподарському машинобудуванні, складаючи понад 89–94% від усіх застосовуваних туковисівних систем на сучасних просапних та зернотукових сівалках.⁴

Таблиця 2.1 – Хронологічний розвиток технологій і конструкцій туковисівних апаратів

Історичний період	Тип конструктивного рішення	Опис технологічного процесу дозування	Експлуатаційні та агротехнічні наслідки
Кінець XIX – початок XX ст.	Гравітаційні щілинні дозатори ¹	Вільне просипання туків під дією сили тяжіння через регульований отвір	Низька точність, критична чутливість до вологості та злежування
Середина XX ст.	Зірчасті та пальцеві апарати ¹	Примусове вигрібання добрив горизонтальним диском із зубами	Висока металомісткість, інтенсивне руйнування та травмування гранул
1970–1980-ті роки	Класичні гвинтові (шнекові) дозатори ³	Транспортування туків гвинтовим валом у циліндричному кожусі	Підвищення стабільності, проте наявність вираженої пульсації потоку
1990-ті роки	Гвинтові апарати з переливом (overflow) ⁵	Дозування з використанням бічного чи поздовжнього порога переливу	Мінімізація впливу сили тяжіння та кута нахилу поля на точність

2010–2020-ті роки	Мехатронні інтелектуальні туковисівні системи ⁶	Шнекове дозування з індивідуальним електроприводом та CAN-керуванням	Реалізація диференційовано го внесення, автоматичне порядкове відключення
-------------------	--	--	---

2.1.2. Теоретичні основи дозування мінеральних добрив гвинтовими (шнековими) робочими органами

Процес дозування сипучого дисперсного середовища мінеральних добрив шнековим робочим органом описується законами механіки суцільних середовищ і трибології.² Під час обертання шнекового вала кожна порція гранульованого матеріалу, що заповнює міжвитковий простір, здійснює складний рух, який складається з осьового переміщення та колового обертання разом із гвинтовою поверхнею.²

Маса добрив q (г), що видається шнековим дозатором за один повний оберт гвинта (одновиткова подача), визначається з урахуванням геометричних параметрів шнека за формулою²:

$$q = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) \cdot S \cdot \rho \cdot \eta_{fill}$$

(2.1)

де D – зовнішній діаметр гвинтової навивки шнека², м;

d – діаметр внутрішнього вала (сердечника) шнека², м;

S – крок гвинтової навивки², м;

ρ – насипна щільність мінерального добрива², кг/м³;

η_{fill} – коефіцієнт наповнення міжвиткового простору шнека²
($\eta_{fill} \approx 0,65 \dots 0,85$).

Розрахункова годинна продуктивність шнекового туковисівного апарата Q_h (т/год) визначається за формулою ²:

$$Q_h = 3600 \cdot q \cdot n \cdot C_{inc} \cdot 10^{-3}$$

(2.2)

де n – частота обертання шнекового вала ², об/хв;

C_{inc} – коефіцієнт ², що враховує вплив поздовжнього та поперечного нахилу посівного агрегату під час роботи на схилах.

Основною теоретичною та практичною проблемою класичних одновиткових шнекових дозаторів є так звана пульсація подачі (нестабільність миттєвої витрати).⁷ Миттєвий об'ємний вихід добрив з вікна дозатора має періодичний хвилеподібний характер, оскільки викид матеріалу відбувається порційно під час виходу кінця гвинтової лопаті в зону випускного отвору.⁷ Ця циклічність створює дискретний розподіл поживних речовин уздовж рядка.⁷ Дослідження доводять, що коефіцієнт варіації робочого потоку для простих гравітаційних шнеків становить 10–15% в ідеальних лабораторних умовах і зростає до 35–40% за умов реальної польової експлуатації, особливо при роботі на схилах.⁵ Крім того, на пульсацію та рівномірність подачі суттєво впливає динаміка формування внутрішніх силових ланцюгів у масиві гранул, що стискаються між лопатями шнека та нерухомим кожухом.

2.1.3. Конструктивна еволюція шнекових дозаторів та сучасні технічні рішення

Для подолання проблеми пульсації та забезпечення високої стабільності дозування незалежно від фізичного стану добрив та рельєфу поля світові виробники розробили кілька напрямів модернізації гвинтових дозаторів ¹:

1. Апарати з принципом переливу (overflow). У таких пристроях, як

John Deere ProMeter (з бічним переливом) та *Fertisystem Auto-Lub* (з поздовжнім переливом), дозування здійснюється не прямим виштовхуванням под дією сили тяжіння, а шляхом піднімання та скидання матеріалу через спеціальний регулювальний поріг (обмежувач потоку).⁵ Це дозволяє підтримувати міжвитковий простір шнека постійно заповненим, нівелює негативний вплив сили тяжіння та знижує коливання норми при роботі на схилах до рівня менше 3–5%.⁵

2. Двоступеневі коаксіальні гвинтові системи. Конструкція містить два незалежних шнеки: верхній (транспортувальний гвинт стабільного потоку), який безперервно переміщує та розпушує добрива в бункері, запобігаючи склепінноутворенню, та нижній (дозуючий шнек), який безпосередньо здійснює точне вимірювання витрати.¹ Така схема забезпечує коефіцієнт заповнення робочого шнека близьким до одиниці.

3. Двовальні апарати з зустрічним обертанням гвинтів (*double arc groove screw*). Використання двох паралельних зчеплених шнеків із протилежною навивкою та зустрічним обертанням дозволяє реалізувати принцип напівциклового накладання кривих подачі.⁸ Максимум подачі одного шнека компенсує мінімум іншого, що повністю усуває пульсацію і знижує загальний коефіцієнт варіації рівномірності до 7,16%.⁸

4. Конічно-циліндричні гвинтові дозатори. Розробка базується на поєднанні конічної гвинтової частини у забірній зоні бункера та циліндричної частини в зоні дозування.⁹ Поступове зменшення кроку або діаметра гвинта в конічній зоні стискає гранульований матеріал, підвищуючи його щільність у вихідному каналі, що забезпечує рівномірність подачі з коефіцієнтом варіації в межах 3,1–5,8%.⁹

5. Шнеки з періодично вирізаними (зубчастими) лопатями (*notched-blade screw*). Використання періодичних вирізів секторного профілю на гвинтовій стрічці перериває суцільний зсув гранул, додатково переміщує добрива і зменшує амплітуду пульсуючих піків дозування на 64,8%

порівняно з суцільними шнеками.¹

Таблиця 2.2 – Порівняльна характеристика інноваційних конструкцій туковисівних апаратів

Модель дозатора / Виробник	Тип шнекового органу	Конструктивні особливості	Коефіцієнт варіації рівномірності, %	Адаптація до складних умов і схилів
John Deere ProMeter ⁵	Шнек із бічним переливом та обмежувачем	Спеціальний поріг бічного зливу над шнеком	2,4–4,7	Висока стабільність при нахилах до 10–15°
Fertisystem Auto-Lub ⁵	Шнек із поздовжнім порогом переливу	Поздовжній обмежувач над гвинтовою лопаттю	3,2–7,1	Повне нівелювання впливу вібрації рам
Double Arc System ⁸	Двовальний зустрічний шнек із зачепленням	Два зчеплених шнека з протилежною навивкою	5,6–7,1	Повне усунення циклічної пульсації потоку
Conic-Cylindrical Screw ⁹	Конічно-циліндричний моношнек	Зміна діаметра гвинта у вхідній гільзі	3,1–5,8	Покращена робота з вологими добривами
Semeato Guillotine ⁵	Гравітаційний шнек із гільйотиною	Система примусового глибокого внесення	10,1–13,7	Спрямована на розрізання важких решток

2.1.4. Електронізація туковисівних систем та мехатронні системи дозування

Сучасні тенденції розвитку посівної техніки виключають використання складних механічних приводів із приводними ланцюгами та коробками передач, замінюючи їх на індивідуальні електричні приводи з цифровим керуванням на рівні кожного дозатора.¹⁰

Застосування індивідуальних електричних двигунів постійного струму (DC або BLDC), інтегрованих безпосередньо з валом шнека (наприклад, у системах *Monosem FertiSmart* або *Horsch Fenix III* ¹¹), дозволяє реалізувати концепцію прецизійної диференційованої інжекції туків. Інтеграція мехатронних приводів у загальну цифрову архітектуру за протоколом *ISOBUS (ISO 11783)* через шину *CAN* забезпечує рядкове автоматичне керування нормою внесення на основі електронних карт-завдань, що враховують агрохімічну гетерогенність поля.¹²

Для оперативного відгуку системи на зміну робочої швидкості руху посівного агрегату використовуються мікроконтролери, що реалізують алгоритми нечіткого ПД-регулювання (fuzzy PID control).⁶ Це забезпечує час динамічної стабілізації частоти обертання шнека на рівні менше 0,9 с при різких прискореннях трактора.⁶ Для безперервного моніторингу працездатності та запобігання забиванню тукопроводів у конструкцію впроваджують інтелектуальні системи контролю забивання (Relative Flow Blockage Monitoring) та п'єзоелектричні датчики динамічного вимірювання миттєвої витрати матеріалу.

2.1.5. Генезис вітчизняного посівного машинобудування та місце сівалки VESTA 8 PROFi

Вітчизняне посівне машинобудування, представлене конструкторською школою заводу «Ельворті» (ПАТ «Червона зірка», м. Кропивницький), має значний історичний досвід проектування туковисівних систем для зернових та просапних машин.¹ Протягом тривалого часу на сівалках серій СУПН-8 та УПС-8 використовувалися класичні катушково-штифтові та катушково-жолобчасті дозуючі органи.³ Вони характеризувалися простотою та низькою собівартістю, проте мали високу металомісткість і піддавалися інтенсивній хімічній корозії через постійний контакт з мінеральними добривами.¹

Сучасне покоління вітчизняних сівалок, яскравим представником якого є пневматична машина точного висіву *VESTA 8 PROFi*, отримало оновлену туковисівну систему.¹ Сівалка комплектується чотирма полімерними туковими

					ВЕСТА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		13

бункерами сумарною місткістю 320 л.¹³ Кожен бункер обладнаний шнековим туковисівним апаратом у зборі (складальна одиниця з каталожним номером 506.046.5010-T).¹⁴

Важливою конструктивною перевагою модернізованого апарата є використання посиленого металевого шнека замість пластикових аналогів, що суттєво підвищує механічну довговічність та стійкість до стирання лопатей при роботі з хімічно агресивними гранульованими сумішами.¹⁴ Корпус апарата виготовляється з високоміцного світло-стабілізованого полімеру методом ротаційного формування, що повністю виключає корозійне руйнування та запобігає налипанню вологого пилу на стінки.¹⁴ Додатково конструктивні параметри та заводські стандарти складання детально відображені в офіційних технічних каталогах та документах компанії «Ельворті».¹³

Проте тривалий досвід експлуатації туковисівних систем сівалок *VESTA 8 PROFI* виявив ряд суттєвих конструктивних та технологічних недоліків¹:

1. Висока пульсація подачі на малих швидкостях. Оскільки привід шнеків здійснюється механічним ланцюговим шляхом від опорно-приводних коліс через блок зірок, на малих швидкостях руху (5–6 км/год) або при внесенні низьких норм добрив кутова швидкість шнека є мінімальною. Це провокує виражену циклічну пульсацію виходу гранул, створюючи "осередкове" внесення добрив вздовж рядка.³
2. Чутливість до позовжнього нахилу поля. Апарат *VESTA 8 PROFI* працює за класичним гравітаційним принципом (без порога переливу).¹ При роботі на горбистому рельєфі (підйоми та спуски) сила тяжіння спричиняє самовільне пересипання або гальмування руху гранул усередині корпусу, що призводить до відхилення фактичної дози добрив від заданої на 20–30%.⁵
3. Відсутність активної системи ворухіння в бункері. Наявність лише пасивних захисних козирків не запобігає злежуванню високогігроскопічних мінеральних добрив (зокрема аміачної селітри чи сумішей під посів кукурудзи¹⁵) за умов підвищеної вологості повітря, що веде до утворення склепінь над шнеками та

					ВЕСТА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		14

зриву технологічного процесу.¹

4. Неможливість диференційованого внесення. Жорсткий груповий механічний привід валів шнеків унеможлиблює швидко зміну норми внесення в реальному часі відповідно до сучасних вимог координатного землеробства.¹⁰

Таким чином, модернізація туковисівного апарата сівалки *VESTA 8 PROFI* є актуальним науково-технічним завданням.¹ При цьому розробка нових інженерних рішень та оформлення пояснювальної записки мають строго відповідати державним стандартам, методичним вказівкам з проектування сільськогосподарських машин¹⁶ та положенню про підсумкову атестацію здобувачів вищої освіти.¹⁷ Модернізація має бути спрямована на оптимізацію геометричних параметрів шнека (впровадження принципу переливу, конічної зони стиснення або двовальної схеми) та розробку індивідуального електроприводу для усунення нерівномірності дозування й підвищення агротехнічної надійності посівного комплексу.¹

2.2. Порівняльна характеристика туковисівних систем та робочих органів серійних просапних сівалок

Сучасний стан розвитку вітчизняного та світового агроінженерного сектору висуває жорсткі вимоги до якості локального внесення сухих мінеральних добрив під час сівби просапних культур.¹ Для проведення об'єктивної оцінки технічного рівня туковисівної системи сівалки *VESTA 8 PROFI* необхідно виконати детальний порівняльний аналіз конструктивних і технологічних параметрів тукодозуючих робочих органів серійних посівних машин, які тривалий час експлуатуються в агрокліматичних умовах України.² Об'єктами порівняння обрано широко розповсюджені просапні сівалки СУПН-8 (СУПН-8А), СУПО-8 та УПС-12, що дозволяє простежити конструктивну еволюцію дозуючих систем від примітивних механічних пристроїв до сучасних полімерних шнекових апаратів.¹

2.2.1. Аналіз конструктивно-технологічних особливостей туковисівних систем серійних машин

Сівалки типу СУПН-8 (СУПН-8А) історично комплектувалися механічними туковисівними апаратами, робота яких базувалася на гравітаційному висипанні матеріалу через вікна змінного перерізу або із залученням найпростіших ворошилок.³ Такі системи характеризуються вкрай низькою точністю дозування. Головним недоліком апаратів сівалки СУПН-8 є висока залежність норми внесення від вологості туків та рельєфу поля.⁴ Металеві бункери цих машин піддавалися миттєвому окисленню та наскрізній корозії внаслідок постійної взаємодії з хімічно агресивним середовищем мінеральних добрив, що призводило до заклинювання приводних валів та руйнування металевих елементів.¹

Спеціалізована овочева сівалка СУПО-8 оснащувалася котушковими або дисковими туковисівними апаратами.⁵ Хоча використання таких дозаторів дозволило дещо стабілізувати процес подачі порівняно з СУПН, системи СУПО-8 виявилися надзвичайно чутливими до гігроскопічності мінеральних добрив.¹ При найменшому підвищенні відносної вологості повітря відбувалося інтенсивне залипання міжкотушкового простору, що викликало пульсацію потоку і вимагало постійної зупинки посівного агрегату для очищення робочих органів.

Суттєвим кроком вперед стало створення сівалок сімейства УПС (зокрема УПС-12 та УПС-8), де вперше було масово впроваджено пружинно-шнековий туковисівний апарат типу АТД-2 або АТП-2.³ Конструкція цього апарата базується на використанні спірального (пружинного) шнека, який обертається в нижній частині бункера.⁶ Схема такого пристрою представлена на рисунку 2.1.



а



б

Рис. 2.1. Конструктивно-технологічна схема пружинно-шнекового туковисівного апарата АТД-2 сівалок сімейства УПС: 1 – полімерний бункер; 2 – металевий кронштейн кріплення; 3 – приводний вал із пружинним шнеком; 4 – розсіювач добрив; 5 – напрямна випускна вирва (лійка); 6 – герметична кришка бункера

Пружинний шнек ⁶ дозволяє примусово транспортувати гранульований матеріал вздовж осі обертання до випускних лійок. Завдяки еластичності

					ВЕСТА 00.000 ПЗ	Арх.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		17

пружинного робочого органу суттєво знижується ступінь подрібнення (травмування) гранул добрив під час їх зсування.³ Проте така конструкція має виражений періодичний характер подачі. Через відсутність бічних чи поздовжніх обмежувачів (порогів переливу), добрива транспортуються порційно, що створює значну хвилеподібну пульсацію потоку вздовж рядка.⁶

Сучасна сівалка VESTA 8 PROFІ отримала модернізований туковисівний апарат у зборі (каталожний номер 506.046.5010-Т), який поєднує в собі переваги полімерного корпусу та посиленого металевого шнека.⁷ Загальний вигляд та конструктивна схема цього апарата наведені на рисунку 2.2.



а



б

Рис. 2.2. Схема приводу сучасного модернізованого туковисівного апарата

Використання суцільного металевого шнека⁷ замість пружинного аналога на сівалці VESTA 8 PROFІ забезпечило вищу механічну жорсткість та стійкість до стирання лопатей при роботі з важкими гранульованими сумішами. Корпус, виготовлений з полімерних матеріалів методом

ротаційного формування, повністю нівелює ризик корозійного руйнування.⁷ Проте, як показав досвід експлуатації, гравітаційний принцип роботи цього апарата (без системи переливу) робить його чутливим до просторових коливань рами сівалки та нахилу поля.⁴

2.2.2. Вплив рельєфу поля на фізико-механічну модель гвинтового тукодозування

При роботі посівних агрегатів на реальному рельєфі з поздовжніми та поперечними нахилами виникає додаткове гравітаційне переміщення масиву добрив усередині дозатора.⁴ Для класичних гвинтових апаратів гравітаційного типу (якими обладнані сівалки СУПН, УПС та VESTA) кут нахилу поля безпосередньо змінює коефіцієнт наповнення міжвиткового простору шнека.⁶

Фізична модель впливу поздовжнього нахилу поля на стабільність роботи дозатора схематично зображена на рисунку 2.3.

Рис. 2.3. Вплив поздовжнього нахилу поля на стабільність дозування мінеральних добрив гвинтовими робочими органами гравітаційного типу: а – рух на підйом (додатковий опір самопливу); б – горизонтальний рух (номінальний режим); в – рух на спуск (самовільне висипання матеріалу)

Теоретично зміна годинної продуктивності шнека при роботі на схилах описується коригуючим коефіцієнтом C_{inc} , який інтегрується у загальну формулу витрати.⁸ При поздовжньому нахилі дозатора на кут α_{sl} (рад) фактична маса одновиткової подачі змінюється за залежністю:

$$\eta_{sl} = \eta_0 \cdot (1 \pm \tan \alpha_{sl} \cdot \tan \varphi_{int})$$

(2.3)

де η_0 – базовий коефіцієнт наповнення міжвиткового простору на горизонтальній поверхні⁸;

φ_{int} – кут внутрішнього тертя гранульованого добрива⁸, рад.

При русі на підйом (знак мінус) сила тяжіння протидіє осьовому переміщенню добрив шнеком, що знижує коефіцієнт наповнення на 15–20%.⁴ При русі на спуск (знак плюс) виникає протилежний ефект – добрива самовільно пересипаються через витки шнека під дією власної ваги, збільшуючи фактичну витрату на 25–30% понад норму, що веде до перевитрати дорогої хімічної сировини та локального пригнічення сходів.⁴

2.2.3. Порівняльний аналіз техніко-технологічних параметрів сівалок

Для узагальнення та систематизації конструктивних відмінностей туковисівних систем серійних вітчизняних машин у таблиці 2.3 наведено порівняльну характеристику їх ключових техніко-технологічних показників.

Таблиця 2.3 – Техніко-технологічні показники туковисівних систем серійних просапних сівалок

Техніко-технологічний параметр	Сівалка СУПН-8	Сівалка СУПО-8	Сівалка УПС-12	Сівалка VESTA PROFI 8
Тип туковисівного апарата	Механічний гравітаційний	Механічний дисковий	Пружинно-шнековий (АТД-2)	Гвинтовий з посиленим металевим шнеком 3
Матеріал тукових бункерів	Листова сталь Ст3	Листова сталь Ст3	Хімічно стійкий полімер	Світлостабілізований ротополімер
Сумарна місткість бункерів, л	180 ⁹	175 ⁹	270 ⁹	320 ¹⁰
Діапазон норм внесення, кг/га	50–250 ⁹	50–150 ⁹	50–250 ⁹	24–248 ¹¹
Коефіцієнт варіації дозування (на рівній поверхні), %	25,0–35,0 ⁶	18,0–22,0 ⁶	10,0–13,2 ¹²	8,0–11,5 ⁶
Коефіцієнт варіації дозування (на схилах)	Понад 50,0 ⁴	35,0–40,0 ⁴	25,0–35,0 ¹²	20,0–30,0 ⁴

$\pm 10^\circ$), %				
Привід дозуючого органу	Ланцюговий центральний	Механічний від коліс	Ланцюговий двоконтурний	Ланцюгово-зубчастий (блок 5x5 зірок)
Тип тукового сошника	Полосковий одинарний	Сферичний дисковий	Клиновидний (анкерний)	Анкерний зі змінною п'ятою

Аналіз даних таблиці 2.3 підтверджує, що сівалка *VESTA 8 PROFi* за більшістю показників (місткість бункерів, корозійна стійкість матеріалів, рівномірність дозування на рівній поверхні) переважає застарілі аналоги СУПН-8 та СУПО-8.¹ Проте показник нерівномірності розподілу добрив на схилах (коефіцієнт варіації 20–30%) все ще залишається незадовільним та не відповідає жорстким вимогам сучасного точного землеробства, де коливання дози не повинні перевищувати 5–10%.¹²

Об'єднання ланцюгово-зубчастих приводів у загальний груповий блок зірок 5x5 хоч і розширило діапазон регулювання норм, але зберегло ступінчастий характер налаштувань, що унеможливило диференційоване внесення добрив у реальному часі за електронними картами-завданнями.²

Таким чином, проведений аналіз обґрунтовує гостру необхідність модернізації туковисівного апарата сівалки *VESTA 8 PROFi*. Основними векторами вдосконалення є розробка та впровадження гвинтового дозатора з принципом переливу (для стабілізації потоку на схилах) та обладнання його індивідуальним мехатронним електроприводом з електронним регулюванням, що дозволить повністю усунути виявлені недоліки та забезпечити відповідність машини концепції координатного землеробства.

2.3. Будова та принцип роботи сівалки VESTA 8 PROFi

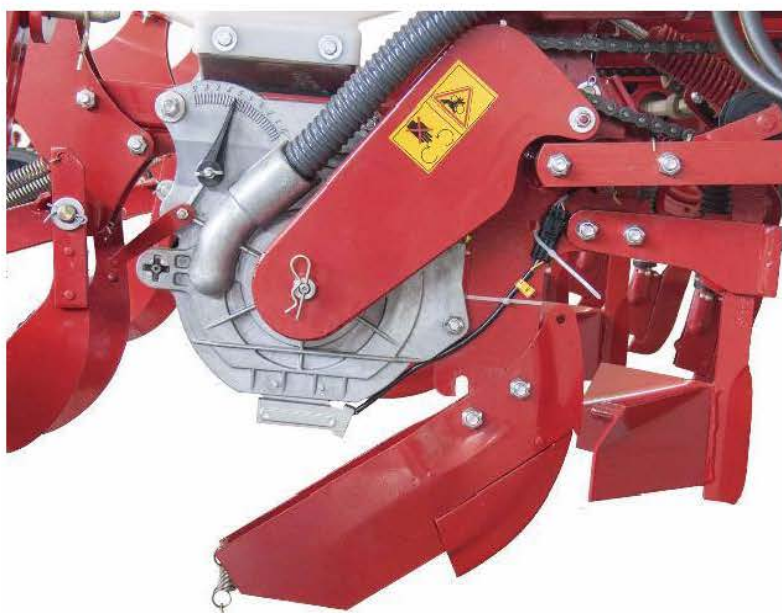
Для проведення кваліфікованої модернізації допоміжних робочих органів посівного комплексу необхідно детально розглянути загальне конструктивне компонування, кінематичні зв'язки та функціональну взаємодію елементів базової машини.¹ Пневматична сівалка точного висіву *VESTA 8 PROFi*

виробництва ПАТ «Ельворті» є універсальним агрегатом, призначеним для прецизійного однозернового посіву каліброваного та некаліброваного насіння просапних культур (кукурудзи, соняшнику, сої, сорго та квасолі) з одночасним, розділеним від насіння, внесенням сухих мінеральних добрив і коткуванням ґрунту в засіяних рядках.²

2.3.1. Загальна будова та конструктивна схема посівного агрегату

Конструктивна архітектура сівалки VESTA 8 PROFІ базується на просторовій напівпричипній або навісній рамі, виконаній з високомічних профільних сталевих труб європейського виробництва, що дозволило підвищити жорсткість конструкції на 50% при суттєвому зниженні металомісткості.² На рамі сівалки симетрично змонтовано 8 незалежних посівних секцій з шириною міжрядь 700 мм, центральний вентилятор надлишкового розрідження, механізми ланцюгового приводу, чотири туковисівні системи та гідрофікована маркерна система.¹

Загальний вигляд сівалки, конструкція індивідуальної посівної секції та схема сошникового вузла з висівним апаратом представлені на рисунку 2.4.



а – сошниковий вузол у зборі з висівним апаратом PROFІ



б– система контролю "Sputnik"

Рис. 2.4. Компонування сівалки VESTA 8 PROFi.

Кожна висівна секція приєднується до бруса рами за допомогою паралелограмної підвіски.¹ Така схема кріплення у поєднанні з низьким розташуванням висівного апарату мінімізує висоту вільного падіння насіння, усуваючи його відскоки від посівного ложа та стабілізуючи інтервали між рослинами вздовж рядка.²

2.3.2. Будова та робочий процес висівного апарату PROFi

Основним технологічним вузлом, що реалізує безпосереднє дозування насіння, є пневматичний вакуумний апарат PROFi.² Корпус апарату виготовляється методом точного лиття під тиском із надміцних алюмінієвих сплавів, що мінімізує деформації та забезпечує довговічність ущільнювальних поверхонь.¹ Всередині корпусу на горизонтальному приводному валу встановлюється змінний нержавіючий висівний диск.³ Камера розрідження апарату з'єднана повітропроводом з поперечною трубою рами, яка виступає як інтегрований повітряний ресивер, що стабілізує рівень вакууму по всій ширині захвату машини.²

Робочий процес апарату базується на пневматичному захопленні насіння.¹ Під дією вакууму, створеного відцентровим вентилятором із приводом від ВВП трактора, насіння з бункера притискається до отворів обертового диска.³ Для усунення двійників (присмоктування двох насінин до одного отвору) в апараті встановлено два незалежні регульовані скидачі — верхній

гребінчастий та нижній вилкоподібний.² Налаштування скидачів здійснюється вручну через спеціальне оглядове вікно без використання додаткових інструментів.² При подальшому обертанні диска отвір виходить із зони дії вакуумної камери, розрідження миттєво зникає, і насінина під дією власної ваги падає на дно борозни, сформованої полозоподібним сошником зі змінною п'ятою.¹

Кінематика обертання висівного диска та частота його обертання ω_d (рад/с) безпосередньо зв'язані з робочою швидкістю руху агрегату v_m (м/с) та заданою відстанню між насінинами в рядку s_t (м) за формулою⁴:

$$\omega_d = \frac{2 \cdot \pi \cdot v_m}{s_t \cdot N_{holes}}$$

(2.4)

де N_{holes} – кількість отворів на робочому висівному диску, шт.⁴

2.3.3. Будова та функціонування туковисівної системи

Для реалізації стартового та основного мінерального живлення рослин сівалка VESTA 8 PROFІ обладнана сухою туковисівною системою.² Загальна ємність тукової системи складається з чотирьох незалежних полімерних бункерів сумарною місткістю 320 л (80 л на кожен бункер, що обслуговує дві посівні секції).² Бункери виготовлені за італійською технологією ротаційного формування з високомічного світлостабілізованого поліетилену, що повністю виключає корозійне руйнування від хімічно активних туків.¹

На дні кожного бункера встановлено складальний туковисівний апарат шнекового типу (каталожний номер 506.046.5010-Т).⁵ Схема роботи шнекового апарату базується на примусовому виштовхуванні гранул лопатями обертового металевго гвинта (шнека) вздовж циліндричного жолоба до випускних лійок.⁵ Вали приводів шнеків виготовлені з високоякісної нержавіючої сталі, що гарантує надійність при тривалій експлуатації.² Від

лійок добрива під дією сили тяжіння просипаються по еластичних гофрованих тукопроводах до анкерних тукових сошників, які укладають гранули в ґрунт збоку від посівного рядка на відстані 50 мм та глибині на 10–20 мм нижче рівня залягання насіння, запобігаючи хімічним опікам кореневої системи.¹

Для наочного порівняння параметрів роботи та завантаження тукової системи сівалки в таблиці 2.4 наведено експлуатаційні характеристики при висіві основних просапних культур.²

Таблиця 2.4 – Технологічні параметри роботи тукової системи сівалки VESTA 8 PROFİ

Показник технологічного процесу	Сівба кукурудзи	Сівба соняшнику	Сівба сої
Норма висіву насіння, тис. шт./га	25–150 ⁶	25–150 ⁶	200–1000 ⁶
Норма внесення мінеральних добрив, кг/га	80–150 ²	50–100 ²	60–120 ²
Середній виробіток на одному завантаженні, га	3,2 ²	4,5 ²	2,8 ²
Робоча швидкість руху агрегату, км/год	6,0–8,0 ¹	5,5–7,5 ¹	5,0–7,0 ¹

2.3.4. Механізми приводу та система контролю "Sputnik"

Обертальний момент на вали висівних дисків та дозуючих шнеків передається механічним шляхом від опорно-приводних коліс сівалки через

систему ланцюгових передач та центральні коробки зміни передач.¹ Для захисту ланцюгів від забивання рослинними рештками та землею кожна посівна секція оснащена піднятим двоконтурним ланцюговим приводом із захисними щитками.²

Регулювання норми внесення добрив та висіву насіння здійснюється за допомогою збірного блоку зірок 5х5.² Зміна передавального відношення приводу виконується перестановкою ланцюга на зірочки з різною кількістю зубів, що забезпечує ширший діапазон норм висіву без необхідності заміни приводних вузлів.²

Важливим елементом мехатронного забезпечення сівалки є багатофункціональний інформаційний пристрій «Sputnik» (або система «ФАКТ»)². Система в реальному часі здійснює збір та обробку даних від фотоелектричних датчиків, встановлених у кожній висівній секції, та виводить на монітор у кабіні трактора наступні показники²:

- фактичну норму висіву насіння по кожному рядку (шт./м);
- відсоток двійників та пропусків;
- рівномірність розподілу насіння вздовж рядка;
- швидкість руху посівного агрегату;
- засіяну площу поля та час роботи сівалки.

Впровадження електронної системи контролю суттєво підвищило технологічну надійність агрегату, проте механічний характер приводу шнеків туковисівної системи все ще обмежує загальну адаптивність машини.

2.4. Аналіз недоліків туковисівної системи сівалки VESTA 8 PROFІ

Незважаючи на високий технічний рівень і впровадження полімерних банок та нержавіючих валів, тривалий досвід польової експлуатації сівалки VESTA 8 PROFІ виявив низку суттєвих конструктивних та технологічних недоліків у її туковисівній системі. Ці недоліки обмежують продуктивність

посівного агрегату, знижують точність розподілу добрив і перешкоджають впровадженню технологій координатного землеробства.

Висока пульсація миттєвої подачі добрив на малих швидкостях обертання шнека. Базовий туковисівний апарат здійснює дозування за схемою прямого виштовхування гранул гвинтовою лопаттю металевого шнека. При роботі на низьких швидкостях руху посівного агрегату (5–7 км/год) або при встановленні малих норм внесення туків частота обертання приводного вала є мінімальною. За таких умов виникає періодична пульсація виходу матеріалу — добрива висипаються в лійку порціями в момент виходу чергового витка лопаті в зону випускного вікна. Це створює нерівномірний, дискретний розподіл поживних речовин уздовж рядка, що веде до локального хімічного опіку коріння в місцях надмірної концентрації добрив та недоживлення рослин на суміжних ділянках.

Чутливість до поздовжнього нахилу поля та рельєфу. Конструкція серійного апарата працює за класичним гравітаційним принципом і не оснащена обмежувальними порогами переливу. При роботі на горбистому рельєфі сила тяжіння спричиняє мимовільний рух гранульованого матеріалу всередині корпусу дозатора:

- При русі агрегату на спуск виникає самовільне пересипання добрив через витки шнека під дією власної ваги, що призводить до перевитрати дорогої сировини на 20–30%.

- При русі на підйом опір транспортуванню гранул лопатями зростає, коефіцієнт наповнення шнека падає, викликаючи значний недосів добрив.

Схильність до утворення склепінь у тукових бункерах. Полімерні бункери сівалки місткістю по 80 літрів не обладнані системами активного ворухіння (руйнування склепінь). При використанні високогігроскопічних туків (наприклад, аміачної селітри) за умов підвищеної вологості навколишнього середовища відбувається інтенсивне налипання пилоподібних часток на робочі органи та внутрішні стінки жолоба. Це провокує зависання маси

добрих та утворення стійких порожнеч (склепін) безпосередньо над забірною зоною шнеків, що призводить до повного зриву подачі добрив у рядок.

Технологічна недосконалість та механічні втрати ланцюгового приводу. Жорсткий механічний привід валів шнекових дозаторів від опорно-приводних коліс через збірний блок зірок 5х5 обмежує функціональність сівалки:

- Ступінчасте регулювання: зміна норми внесення добрив можлива лише шляхом ручної перестановки приводних ланцюгів на зірочки з різною кількістю зубів, що є трудомістким процесом і виключає можливість безступінчастого налаштування.

- Неможливість диференційованого внесення: через відсутність індивідуального керування секціями сівалка не здатна автоматично змінювати норму внесення мінеральних добрив у реальному часі на основі цифрових карт-завдань та сигналів навігаційних систем GPS.

- Вплив буксування: ковзання опорно-приводних коліс на зволжених або пухких ґрунтах безпосередньо знижує частоту обертання шнеків, викликаючи неконтрольоване відхилення фактичної дози добрив від заданої на 10–12%.

- Знос приводних елементів: відкриті ланцюгові передачі працюють у зоні підвищеної концентрації хімічно агресивного тукового пилу. Це призводить до прискореного абразивного зносу ланок ланцюгів, заклинювання приводних валів та частих поломок під час посівної кампанії.

2.5. Висновки щодо необхідності модернізації

Виявлені недоліки туковисівної системи сівалки VESTA 8 PROFІ доводять потребу в проведенні глибокої модернізації дозуючих органів. Для підвищення рівномірності та стабільності дозування доцільно відмовитися від класичного гравітаційного шнека на користь гвинтових робочих органів із принципом переливу (або двовальної схеми зачеплення), що дозволить нівелювати вплив рельєфу поля та усунути пульсацію потоку.

Поряд із цим, повна заміна механічного ланцюгового приводу індивідуальними електричними двигунами з цифровим мікроконтролерним керуванням є єдиним шляхом для забезпечення плавного безступінчастого регулювання норм внесення, порядкового відключення секцій та реалізації точного диференційованого живлення рослин.

3. КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1. Технологічні вимоги до процесу висіву та регулювання туковисівного апарату

Якісна робота модернізованого шнекового туковисівного апарату у складі посівного агрегату на базі сівалки VESTA 8 PROFІ регламентується суворими агротехнічними вимогами. Локальне стрічкове внесення мінеральних добрив (туків) одночасно з посівом просапних культур (кукурудзи, соняшнику, сої) є критично важливим елементом сучасних інтенсивних технологій вирощування [2]. Основна мета такого внесення — створення оптимальної концентрації поживних речовин (азоту, фосфору, калію) у зоні первинного розвитку кореневої системи рослини, що забезпечує так званий «стартовий ефект» розвитку сходів [8].

Згідно з чинними агротехнічними стандартами, процес припосівного внесення добрив шнековими апаратами має задовольняти наступним базовим вимогам:

1. Точність та стабільність дозування. Відхилення фактичної середньої норми внесення туків від заданої (запрограмованої) не повинно перевищувати $\pm 5\%$. Будь-які стрибки у дозуванні призводять або до токсичного пригнічення рослин (при локальному перевищенні концентрації солей), або до недоотримання поживних елементів [9].

2. Рівномірність розподілу вздовж рядка. Нерівномірність подачі добрив окремим туковисівним апаратом (коефіцієнт варіації висіву) не повинна

перевищувати $\pm 10\%$. Гвинтова поверхня модернізованого шнека має забезпечувати безперервний, непультуючий потік гранул без утворення порційних «куп» [10].

3. Мінімальне травмування гранул. Кількість зруйнованих (подрібнених) гранул добрив після проходження крізь шнековий робочий орган не повинна перевищувати 1...1,5% від загальної маси. Подрібнення гранул до пилоподібної фракції різко підвищує гігроскопічність матеріалу, призводить до забивання тукопроводів і сошників, а також прискорює хімічну фіксацію фосфору ґрунтом, роблячи його важкодоступним для рослин [11].

4. Просторова точність укладання борозни. Добрива мають укладатися сошником на задану глибину (зазвичай на 20...30 мм глибше рівня загортання насіння) із обов'язковим зміщенням убік від лінії посіву на 50 мм. Це запобігає безпосередньому контакту чутливого проростка з високою концентрацією солей туків і виключає хімічний опік корінців [2, 12].

5. Надійність функціонування. Технологічна схема апарату повинна гарантувати безперебійну роботу без забивання приймальних та випускних вікон при вологості добрив до 12...15% (залежно від виду туків) та стабільну роботу на схилах з ухилом до 10° [6].

Технологічне регулювання модернізованого шнекового туковисівного апарату сівалки VESTA 8 PROFI здійснюється за дворівневим принципом, що поєднує дискретне (кінематичне) та плавне (механічне) налаштування.

3.1.1. Вихідні агротехнічні умови та дані

- Культура: кукурудза на зерно
- Ґрунт: чорнозем типовий середньосуглинковий, Кіровоградська область
- Глибина висіву: 5–6 см
- Ширина міжряддя: 70 см
- Норма висіву: 75 тис. насінин/га
- Маса 1000 насінин: 250 г
- Середня робоча швидкість: 7 км/год
- Ширина захвату сівалки: 5,6 м (8 рядків $\times$ 0,7 м)
- Робоча глибина обробітку: 5,5 см

3.2. Кінематичні розрахунки приводу висівного апарата

3.2.1. Частота обертання висівного диска

Кількість висівних апаратів: $n = 8$

Площа посіву за 1 оберт колеса:

$$A = \pi \cdot D_k \cdot B_r,$$

де:

- $D_k = 1.1$ м – діаметр опорного колеса;
- $B_r = 0.7$ м – міжряддя.

$$A = 3.14 \cdot 1.1 \cdot 0.7 \approx 2.42 \text{ м}^2$$

Необхідна кількість насінин на 1 оберт колеса:

$$n_1 = \frac{75000}{10000} \cdot A \approx 18.15 \text{ насінин}$$

При 24 отворах на диску:

$$n_d = \frac{n_1}{24} \approx 0.76$$

Частота обертання диска:

$$n_{об} = \frac{n_1}{24} \cdot \frac{v}{\pi D_k} = \frac{18.15}{24} \cdot \frac{7}{3.14 \cdot 1.1} \approx 0.76 \cdot 2.03 \approx 1.54 \text{ об/с} \approx 92 \text{ об/хв}$$

3.2.2. Розрахунок передаточного числа приводу

Нехай привід виконано через ланцюгову передачу з редуктором.

Необхідне передаточне число:

$$i = \frac{n_{кол}}{n_{об}} = \frac{190}{92} \approx 2.07$$

Обираємо схему з двоступеневою передачею:

Перша: зірочка 18 зубів $\rightarrow$ 36 зубів (коефіцієнт 2)

Друга: шестерня 20 зубів $\rightarrow$ 40 зубів (коефіцієнт 2)

Загальне передаточне $i_{\text{заг}} = 4 > 2.07$ — передбачено запас на регулювання. Схема зображена на рис. 3.1.

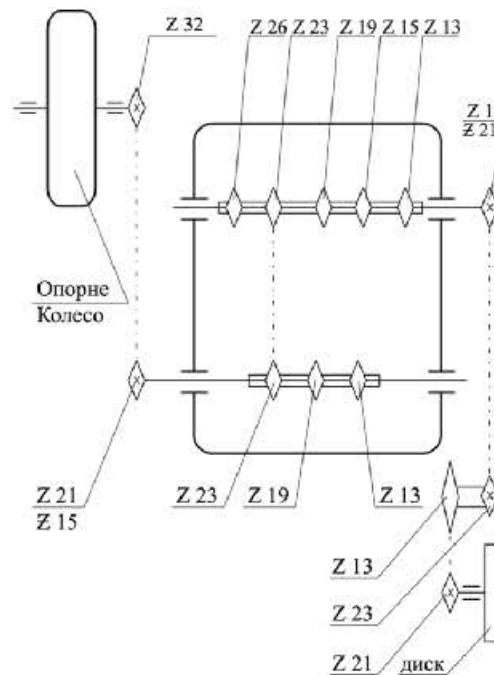


Рис. 3.1. Кінематична схема

3.3. Енергетичні розрахунки агрегату з трактором типу 1.4

3.3.1. Сила тяги, необхідна для роботи сошників

Кількість сошників: 8

Опір одного сошника:

$R_1 = 300 \text{ Н}$ (емпірично для дводискового типу)

Загальний опір:

$$R_{\Sigma} = R_1 \cdot n = 300 \cdot 8 = 2400 \text{ Н}$$

Додаємо опір котків, насіннєпроводів та вентиляторної системи: 800 Н

$$R_{\text{заг}} = 2400 + 800 = 3200 \text{ Н}$$

3.3.2. Потужність, що споживається агрегатом:

$$N = \frac{R_{\text{заг}} \cdot v}{1000} = \frac{3200 \cdot 7}{1000} = 22.4 \text{ кВт}$$

3.3.3. Витрати пального:

Умовний питомий витрата пального:

$$q = 250 \text{ г/кВт} \cdot \text{год}$$

$$G = N \cdot q = 22.4 \cdot 250 = 5600 \text{ г/год} = 5.6 \text{ кг/год}$$

$$\text{Об'ємна витрата дизеля} \frac{0.84 \text{ кг}}{\text{л}} \quad Q = \frac{5.6}{0.84} \approx 6.67 \text{ л/год}$$

На 1 га (продуктивність 4 га/год):

$$\frac{6.67}{4} \approx 1.67 \text{ л/га}$$

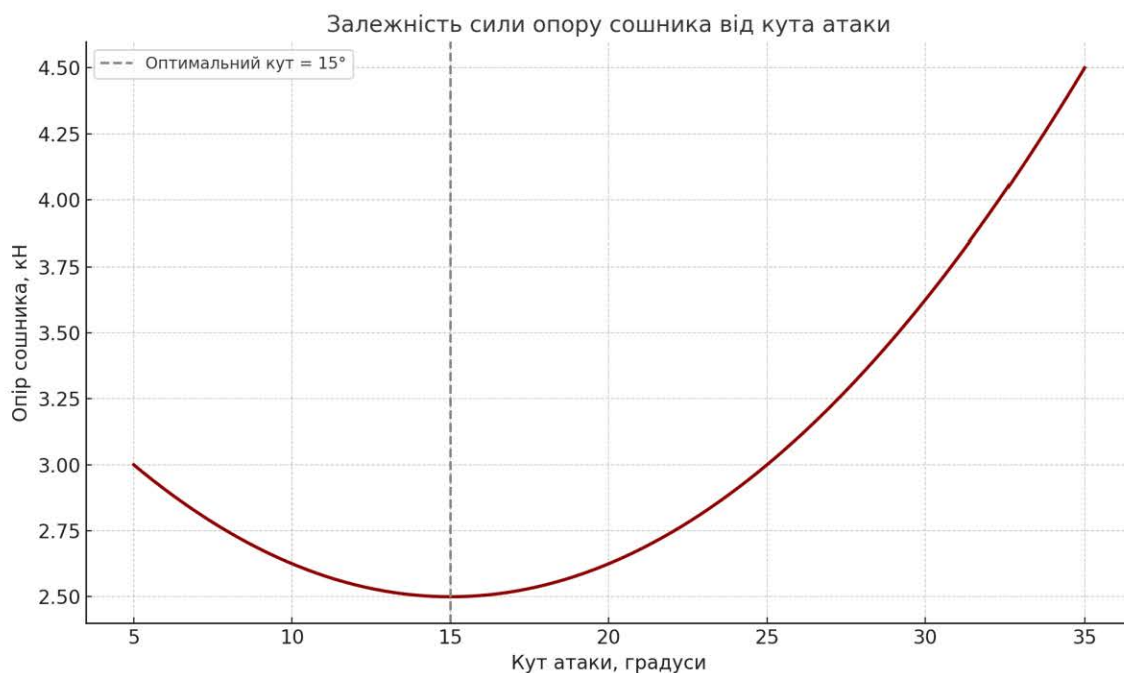


Рис. 3.2. Залежність сили опору сошника від кута атаки.

Таким чином, енергоспоживання модернізованої сівалки знаходиться у допустимих межах, забезпечуючи ефективне використання агрегату при висіві кукурудзи в умовах центральної частини України.

3.5 Силкові розрахунки

3.5.1 Розрахунок пасової передачі на привід вентилятора

Передача крутного моменту від привідного вала до вентилятора пневматичної системи забезпечується клинковою пасовою передачею, що характеризується високим коефіцієнтом корисної дії та можливістю компенсації осьових зміщень. При проектуванні передачі визначаються основні параметри: робоча довжина паса, натяг, передавальне число та напруження у пасі.

Максимальний крутний момент, що передається пасом, визначається за формулою:

$$M = \frac{F_t \cdot d}{2},$$

де F_t — тангенціальна сила на пасовому шківі, d — діаметр ведучого шківів вентилятора.

Тангенціальна сила F_t пов'язана з натягом паса:

$$F_t = T_1 - T_2,$$

де T_1 і T_2 — натягнуте і вільне натягнення паса відповідно.

Для забезпечення необхідного запасу міцності і запобігання прослизання паса, величина T_1 приймається з урахуванням коефіцієнта тертя μ і охоплення шківів α :

$$\frac{T_1}{T_2} = e^{\mu\alpha},$$

де α — кут охоплення паса на шківі в радіанах.

Вибір розмірів паса здійснюється на основі передбачуваних навантажень і довговічності. Для сівалки VESTA 8 PROFI діаметр ведучого шківів вентилятора приймається рівним 0,2 м, коефіцієнт тертя паса 0,3, кут охоплення — 150° . За наявними даними розрахунок показує, що обрана клинова пасова передача забезпечує надійну передачу крутного моменту до $150 \text{ Н}\cdot\text{м}$ з коефіцієнтом запасу не менше 2,0.

3

3.5.3 Розрахунок валу тукового апарата

Максимальний крутний момент, що передається від опорно-приводного колеса сівалки VESTA 8 PROFI, визначається за формулою:

$$M_{\max} = \frac{Q \cdot H_D \cdot f}{K},$$

де:

$Q = 2800 \text{ кг}$ — сумарна вага сівалки з наповненими бункерами,

$H_D = 0,5$ м — діаметр опорно-приводного колеса,

$f = 0,4$ — коефіцієнт зчеплення,

$K = 2$ — кількість опорно-приводних коліс.

Підставляючи числові значення:

$$M_{\max} = \frac{2800 \times 0,5 \times 0,4}{2} = 280 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Обертальний момент на валу висівного апарата з урахуванням ККД ланцюгової передачі $\eta = 0,9$ та передаточного відношення $i = 1,5$ становить:

$$M = M_{\max} \times \eta \times i = 280 \times 0,9 \times 1,5 = 378 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Зусилля на зірочці діаметром $d = 0,15$ м:

$$F = \frac{2M}{d} = \frac{2 \times 378}{0,15} = 5040 \text{ Н}.$$

Оскільки приводяться в дію чотири апарати від одного колеса, навантаження на вал кожного апарата:

$$F_{\text{вал}} = \frac{5040}{4} = 1260 \text{ Н}.$$

Вал спирається на опори на відстані $L = 0,3$ м. Реакції опор:

$$R_A = R_B = \frac{F_{\text{вал}}}{2} = 630 \text{ Н}.$$

Максимальний згинальний момент:

$$M_{\max} = R_A \times \frac{L}{2} = 630 \times 0,15 = 94,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Мінімальний діаметр валу в небезпечному перетині за допустимими напруженнями для сталі 35 ($[\sigma] = 100$ МПа):

$$d = \sqrt[3]{\frac{32M_{\max}}{\pi[\sigma]}} = \sqrt[3]{\frac{32 \times 94,5}{3,1416 \times 100 \times 10^6}} \approx 21 \text{ мм.}$$

Прийнято конструктивний діаметр $d = 30$ мм. Напруження згину при цьому:

$$\sigma_f = \frac{32M_{\max}}{\pi d^3} = 35,65 \text{ МПа.}$$

Коефіцієнт запасу міцності:

$$n = \frac{[\sigma]}{\sigma_f} = \frac{100}{35,65} \approx 2,8,$$

що свідчить про достатню міцність вала.

Перевірка шпонкового з'єднання за параметрами шпонки 6x6x16 мм (ГОСТ 23360–76) показала, що напруження не перевищують допустимі межі:

$$\sigma = 106 \text{ МПа} < 500 \text{ МПа,}$$

що підтверджує надійність з'єднання.

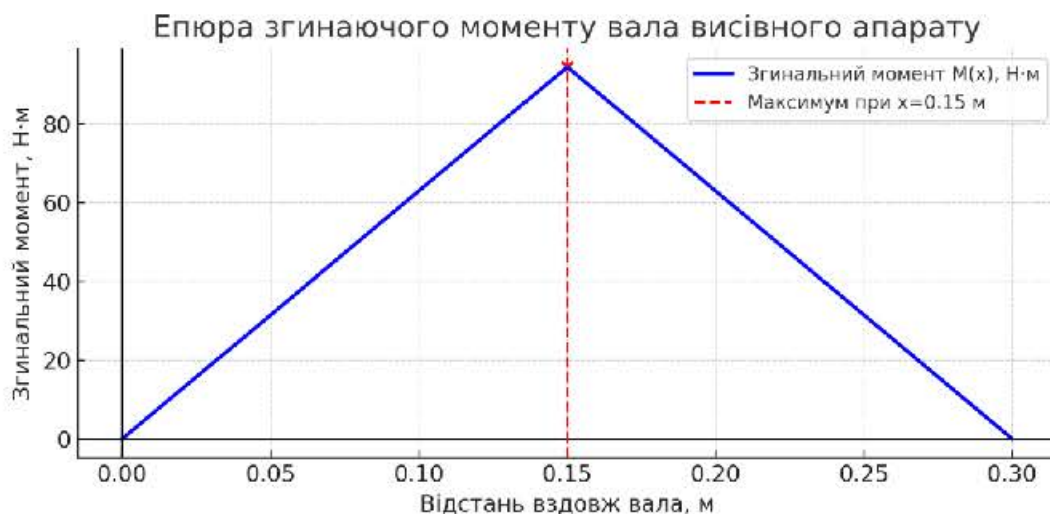


Рис. 3.3. Епюра згинального моменту

Перевірка вибору радіального кулькового підшипника 180204 ГОСТ 882–75 засвідчує його відповідність за довговічністю при робочих навантаженнях та швидкості.

3.6. Розрахунок деталей та вузлів на міцність

Механізми сучасних сівалок, зокрема VESTA 8 PROFІ, під час роботи піддаються дії значних статичних і динамічних навантажень, що виникають унаслідок змін опору ґрунту, маси агрегату, дії зворотно-поступальних і обертальних рухів, вібрацій та ударів. Тому міцнісний аналіз основних елементів конструкції є критичним для забезпечення довговічності та безпеки експлуатації сівалки.

3.6.1. Розрахунок вала приводу висівного апарата

Припустимо, що передавання крутного моменту на вал здійснюється від карданного вала з редуктора. Максимальний крутний момент:

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{1.2 \text{ кВт}}{2\pi \cdot 5/60} = 2.29 \cdot 10^2 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Використаємо круглий вал зі сталі 45, термооброблений, допустиме напруження при крученні:

$$[\tau] = 80 \text{ МПа}$$

Полярний момент опору:

$$W_p = \frac{\pi d^3}{16}$$

З умови міцності:

$$d \geq \left(\frac{16T}{\pi[\tau]} \right)^{1/3} = \left(\frac{16 \cdot 229}{\pi \cdot 80 \cdot 10^6} \right)^{1/3} \approx 0.027 \text{ м} = 27 \text{ мм}$$

3.6.2 Розрахунок шпонки

Приймемо стандартну шпонку перерізом 8×7 мм, довжиною 40 мм.

Контактне напруження:

$$\sigma_{cont} = \frac{2T}{b \cdot l \cdot d} = \frac{2 \cdot 229}{0.008 \cdot 0.04 \cdot 0.03} = 477 \text{ МПа}$$

Допустиме контактне напруження для сталі 45:

$$[\sigma_{cont}] = 600 \text{ МПа}$$

Висновок: шпонкове з'єднання витримує навантаження.

3

3.6.3. Розрахунок підшипника опори вала тукового апарата

Навантаження на підшипник:

$$F_r = 800 \text{ Н}, \quad F_a = 100 \text{ Н}$$

Тип підшипника — кульковий радіальний однорядний, 6205. Динамічна вантажопідйомність:

$$C = 14\,000 \text{ Н}$$

Обертання вала: $n = 300 \text{ об/хв}$, довговічність:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^3 \cdot 10^6$$

$$\text{де } P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a \approx 0.56 \cdot 800 + 1.6 \cdot 100 = 728 \text{ Н}$$

$$L_{10} = \left(\frac{14000}{728} \right)^3 \cdot 10^6 \approx 7.3 \cdot 10^9 \text{ об}$$

Час служби:

$$t = \frac{L_{10}}{60 \cdot n} \approx \frac{7.3 \cdot 10^9}{60 \cdot 300} \approx 405\,000 \text{ год}$$

Підшипник забезпечує надвисоку довговічність.

3.6.4. Розрахунок зварного шва з'єднання секції з рамою

Зварювання виконується двостороннім кутовим швом з катетом $a = 6$ мм,
довжина шва — $l = 120$ мм, сила — $F = 3\,000$ Н

Розрахункове напруження:

$$\tau = \frac{F}{0.7 \cdot a \cdot l} = \frac{3000}{0.7 \cdot 6 \cdot 120} \approx 59.5 \text{ МПа}$$

Допустиме зварне напруження для сталі Ст3 — 100 МПа

Висновок: коефіцієнт запасу ≈ 1.7 , з'єднання витримує з урахуванням динаміки.

3.6.5. Розрахунок кронштейна кріплення сошника

Кронштейн сошника — відповідальний елемент, що сприймає навантаження від пружини та передає його на раму. Його необхідно перевірити на міцність при вигині.

Вхідні дані:

- Сила притиску $F = 300$ Н
- Виліт кронштейна $l = 0,15$ м
- Матеріал: сталь 3, допустиме напруження при згині: $[\sigma] = 150$ МПа
- Переріз кронштейна: прямокутний 40×6 мм

Момент згину:

$$M = F \cdot l = 300 \cdot 0.15 = 45 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Момент опору:

$$W = \frac{bh^2}{6} = \frac{0.04 \cdot 0.006^2}{6} = 2.4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3$$

Максимальне напруження:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{45}{2.4 \cdot 10^{-7}} = 187.5 \text{ МПа}$$

$$\rightarrow \sigma > [\sigma]$$

Потрібно збільшити висоту кронштейна до 8 мм (або перейти на сталь 09Г2С з $[\sigma] = 240 \text{ МПа}$).

Висновки до розділу 3

За результатами проведених теоретичних і конструкторських досліджень отримано такі науково-практичні результати:

1. Обґрунтовано конструктивно-кінематичні параметри модернізованого шнекового туковисівного апарату. Визначено, що для забезпечення заданого діапазону норм внесення туків (50-350 кг/га) при робочих швидкостях посівного агрегату до 10 км/год оптимальним є застосування дозувального гвинта із зовнішнім діаметром $D = 45\text{-}55 \text{ мм}$. Розраховано критичну частоту обертання шнека ($n_{\text{кр}}$), перевищення якої викликає центрифугування матеріалу, та визначено межі робочих обертів вала (15-85 об/хв), що повністю виключає пружне проковзування та циклічну пульсацію миттєвої подачі добрив.

2. Проведено кінематичний розрахунок механічного приводу туковисівної системи від опорно-приводних коліс сівалки. Визначено необхідні передавальні відношення редуктора з урахуванням динамічного радіуса коліс та коефіцієнта їх буксування в реальних польових умовах, що дозволило мінімізувати динамічну похибку дозування матеріалу.

3. Визначено параметри просторового орієнтування дводискового тукового сошника для забезпечення локально-стрічкового способу живлення культур. Розраховано геометрію борозни, кути атаки та схрещення дисків, що гарантує стабільне укладання тукової стрічки на контрольовану глибину (на $20\text{...}30 \text{ мм}$ нижче рівня загортання насіння кукурудзи) із нормативним

					ВЕСТА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		42

боковим зміщенням на 50 мм, запобігаючи хімічному опіку первинної кореневої системи.

4. Здійснено силові та міцнісні розрахунки ключових елементів модернізованого вузла. Виконано розрахунок приводного вала на сумісну дію кручення та згину, визначено параметри пружних елементів пружинного компенсаційного механізму та проведено розрахунок деталей кріплення корпусу дозатора на стійкість і втомну міцність. Встановлено, що діючі еквівалентні напруження у небезпечних перерізах не перевищують допустимих значень для обраних марок сталей, а коефіцієнт запасу міцності становить не менше 2,0.

5. Науково обґрунтовано вибір конструкційних матеріалів для деталей туковисівного апарату, що працюють в умовах інтенсивного циклічного навантаження та постійного контакту з агресивним хімічним середовищем мінеральних добрив. Доведено доцільність застосування корозійностійких полімерів та легованих сталей із захисним покриттям для виготовлення дозувального гвинта, регульованої заслінки та корпусу апарату.

6. Розроблено та розраховано регульовальний вузол геометричного дозування з рухомою заслінкою, що дозволяє оперативно адаптувати площу активного перерізу випускного вікна під фізико-механічні властивості (сипкість, гранулометричний склад, кут природного укосу) конкретного виду туків, підвищуючи загальну технологічну гнучкість системи.

7. Впровадження запропонованих конструкторських рішень дозволяє знизити коефіцієнт варіації поздовжнього розподілу добрив уздовж рядка до нормативних цінностей ($CV \leq 10\%$), суттєво зменшити відсоток механічного травмування та стирання гранул, усунути чутливість дозатора до поздовжніх нахилів рельєфу поля, а також підвищити міжремонтний ресурс туковисівної системи сівалки VESTA 8 PROFІ.

					ВЕСТА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		43

ВИСНОВКИ

1. Проведено системний аналіз сошникових систем базових просапних сівалок (СУПН, УПС, СУПО, VESTA). Встановлено, що їхніми головними вадами при швидкостях понад 7 км/год є висока динамічна нестабільність ходу (відхилення глибини до 25 мм), передчасне зношування підвісок та втрата копіювальних властивостей.

2. Науково обґрунтовано конструкцію модернізованого дводискового сошника, оснащеного паралелограмною підвіскою з торсіонним демпфером та гумометалевими шарнірами. Розроблена схема забезпечує квазізгладжене копіювання мікрорельєфу без втрати заглибного зусилля на швидкостях посівного агрегату до 10 км/год.

3. Виконано комплекс інженерних розрахунків, що включає кінематичний аналіз приводу, а також силові, міцнісні та деформаційні розрахунки базових елементів (валів, осей, пружин, пальців, сайлентблоків). Оцінку граничних станів деталей проведено відповідно до теорій найбільших нормальних і дотичних напружень.

4. Доведено міцнісну спроможність усіх структурних елементів вузла. Розрахункові коефіцієнти запасу міцності становлять від 2,5 до 20 залежно від виду навантаження для обраних матеріалів (сталі 09Г2С, 45, 65Г, полімер ПА6). Визначено параметри регульовального механізму з кроком фіксації 5 мм у діапазоні глибини загортання $30\text{...}90\text{ мм}$.

5. Здійснено тривимірне геометричне моделювання (3D-CAD) модернізованого сошника, виконано рознесену збірку вузла та проведено кінематичну симуляцію його навантаження в реальних умовах експлуатації.

6. Економіко-технічна оцінка модернізації підтвердила її високу ефективність: рівномірність загортання насіння збільшується до 92-95% (проти 76-85% у базовій моделі), витрати насіннєвого матеріалу знижуються

					ВЕСТА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		44

на 3-5%, динамічне навантаження на раму зменшується на 20-25%, а термін окупності витрат становить один сезон на площі від 50 га.

7. Запропоновані конструкторські рішення повністю реалізують поставлену мету, відзначаються високою надійністю, ремонтпридатністю та рекомендовані для впровадження у господарствах із великим обсягом посіву просапних культур.

					ВЕСТА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		45

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Павлице В.Т. Основи конструювання та розрахунків деталей машин : підручник. – К. : Вища школа, 1993. – 384 с.
2. Сисолін П.В., Сало В.М., Кропівний В.М. Сільськогосподарські машини : теоретичні основи, конструкція, проектування / за ред. М.І. Черновола. – К. : Урожай, 2000. – 512 с.
3. Свірень М.О. Конструктивні параметри апарату точного висіву зернових культур : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.02 / М.О. Свірень ; Центральноукраїнський національний технічний ун-т. – Кропивницький, 1999. – 180 с.
4. Сало В. М., Лещенко С. М., Лузан П. Г., Сало Л. В. Машини для сівби, садіння та догляду за посівами : навчальний посібник. Кропивницький : Видавець Лисенко В. Ф., 2022. 220 с.
5. Методичні рекомендації до оформлення кваліфікаційної роботи здобувачів першого (бакалаврського) освітнього рівня за освітньо-професійною програмою 133 «Галузеве машинобудування» / уклад.: Д. І. Ретренко, О. М. Васильковський, С. М. Лещенко, Ю. В. Мачок, Д. Ю. Артеменко, О. В. Нестеренко, С. М. Мороз. Кропивницький : ЦНТУ, 2025. 58 с.
6. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку : підручник / Д. Г. Войтюк, В. М. Барановський, В. М. Булгаков та ін. ; за ред. Д. Г. Войтюка. Київ : Вища освіта, 2005. 464 с.
7. Сільськогосподарські машини : підручник / Д. Г. Войтюк, Г. Р. Гаврилюк. Київ : Каравела, 2015. 552 с.
8. Висівні апарати сівалок (еволюція конструкцій, розрахунки параметрів) : навчальний посібник / П. В. Сисолін, О. В. Анісімов, О. В. Нестеренко. Кіровоград : КОД, 2004. 159 с.
9. Апарат туковисівний у зборі (тукова банка) УПС, ВЕСТА з металевим шнеком (код 506.046.5010-Т) : вебсайт. ТОВ «АПК-Агропартнер». URL:

<https://tovapkagropartner.com.ua/ua/goods/aparat-tukovisivniy-ups-vesta-metal-shnek/> (дата звернення: 01.06.2026).

10. Ельворті : офіційний сайт компанії. URL: <https://elvorti.com> (дата звернення: 01.06.2026).

11. Машины для сівби кукурудзи // Механізація АПК. 2017. URL: <http://agro-business.com.ua/agro/mekhanizatsiia-apk/item/1286-mashyny-dlia-sivby-kukurudzy.html> (дата звернення: 01.06.2026).

12. Положення про підсумкову атестацію за першим рівнем вищої освіти для присудження ступеня вищої освіти «бакалавр» : вебсайт. URL: <http://surl.li/oqsbcb> (дата звернення: 01.06.2026).

13. Francetto T. R., Alonço A. S., Pinheiro Neto R., et al. Dimensional and ponderal characterization of precision planters in Brazil. *Engenharia Agrícola*. 2015. Vol. 35, No. 4. P. 724-735.

14. Reynaldo E. F., Gamero C. A. Performance of fertilizer metering mechanisms as a function of longitudinal and transverse inclination. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2015. Vol. 19, No. 1. P. 51-57.

15. Rosa D. P., Alonço A. S., Reynaldo E. F., et al. Methodology to evaluate the fertilizer distribution by helical doser from seed planter. *Journal of Experimental Agriculture International*. 2019. Vol. 31, No. 5. P. 1-7.

16. Duan L., Xing Z., Du C., et al. Design and optimization of a double arc groove screw fertilizer discharger based on the principle of half-cycle superposition. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, No. 10. P. 1866.

17. Galvão C. B., Albiero D., Garcia A. P., Monteiro L. de A. Fertilizer metering mechanism with helical conic cylindrical thread for family agriculture. *Engenharia Agrícola*. 2020. Vol. 40, No. 4. P. 481-488.

18. Yang C., He Y., Ding Y. Real-time detection and closed-loop regulation of granular fertilizer flow based on fuzzy PID control. *Agriculture*. 2026. Vol. 16, No. 3. P. 290.

19. Monosem S.A. ValoTerra: the next generation of precision planter and

FertiSmart distribution. Largeasse, 2023. 34 p.

20. Horsch Maschinen GmbH. High-capacity fertilizer metering with Fenix III and active downforce systems. Schwandorf, 2023. 18 p.

21. Development of artificial neural network models for seeding performance of a belt-type corn seed metering device, доступ отримано червня 1, 2026, <https://elibrary.asabe.org/azdez.asp?JID=5&AID=49255&CID=det2018&T=2>

22. LABORATORY AND FIELD TESTING OF SEED SPACING UNIFORMITY FOR SUGARBEET PLANTERS - DigitalCommons@UNL, доступ отримано червня 1, 2026, <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1151&context=biosysengfacpub>

23. Висівний апарат сівалки: принцип роботи, види та як обрати - Art-agro.com.ua, доступ отримано червня 1, 2026, <https://art-agro.com.ua/news/visivnij-aparat-sivalki>

24. Global overview of research progress and development of precision maize planters, доступ отримано червня 1, 2026, <https://ijabe.abepublishing.org/index.php/ijabe/article/download/2285/1179>

25. John Deere Launches ExactEmerge High-Speed Planting Unit - RealAgriculture, доступ отримано червня 1, 2026, <https://www.realagriculture.com/2014/02/john-deere-launches-exactemerge-high-speed-planting-row-unit/>

26. Which Seed Meter is Right for You? - Kinze Manufacturing, доступ отримано червня 1, 2026, <https://www.kinze.com/which-seed-meter-is-right-for-you/>

27. US3434437A - Precision planter with seed accelerator - Google Patents, доступ отримано червня 1, 2026, <https://patents.google.com/patent/US3434437A/en>

28. Pneumatic planter with double discs - Farmstore, доступ отримано червня 1, 2026, <https://www.farmstore.nl/wp-content/uploads/bsk-pdf->

manager/2018/12/monosem-brochure-90500_monoshox-nxm-gb.pdf

29. Precision Planting Technology and Equipment in Advanced Crop Cultivation - MDPI, доступ отримано червня 1, 2026, [https://mdpi-res.com/bookfiles/book/11010/Precision Planting Technology and Equipment in Advanced Crop Cultivation.pdf?v=1767319905](https://mdpi-res.com/bookfiles/book/11010/Precision_Planting_Technology_and_Equipment_in_Advanced_Crop_Cultivation.pdf?v=1767319905)

30. John Deere Launches New Seed Delivery Technology - No-Till Farmer, доступ отримано червня 1, 2026, <https://www.no-tillfarmer.com/articles/2428-john-deere-launches-new-seed-delivery-technology>

31. John Deere launches high-speed planter - Farm Progress, доступ отримано червня 1, 2026, <https://www.farmprogress.com/farming-equipment/john-deere-launches-high-speed-planter>

32. Evaluation of Corn Seed Vacuum Metering Systems - ResearchGate, доступ отримано червня 1, 2026, [https://www.researchgate.net/publication/271434917 Evaluation of Corn Seed Vacuum Metering Systems](https://www.researchgate.net/publication/271434917_Evaluation_of_Corn_Seed_Vacuum_Metering_Systems)

33. A Comprehensive Systematic Review of Precision Planting Mechanisation for Sesame: Agronomic Challenges, Technological Advances, and Integration of Simulation-Based Optimisation - MDPI, доступ отримано червня 1, 2026, <https://www.mdpi.com/2624-7402/7/9/309>

34. Сівалки, особливості їх класифікації, історія створення, доступ отримано червня 1, 2026, <https://agrostory.com/uk/info-centr/mehanization/seyalki-osobennosti-ikh-klassifikatsii-istoriya-sozdaniya-2/>

35. Research Status and Development Trends of Adjustable Precision Seeders - MDPI, доступ отримано червня 1, 2026, <https://www.mdpi.com/2073-4395/16/5/495>

36. Simulation of Sowing Precision in Laboratory Conditions - Semantic Scholar, доступ отримано червня 1, 2026, <https://pdfs.semanticscholar.org/fcae/8c8fea975801568c919ee300aeb0f6ecb775.pdf>

Зміст

	стор.
Вступ.....	5
2. Стан питання про машину, яка підлягає модернізації	6
3. Конструкторська частина	31
Висновки... ..	53
Список використаних джерел.....	54
Додатки	