

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:

Механізація післязбиральної обробки вівса з
удосконаленням решітної частини зерноочисної машини СМ-4

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

ОПП «Агроінженерія»

спеціальності 208 «Агроінженерія»

_____Онойко Владислав Володимирович

« ____ » _____ 2026 р.

Керівник проекту

доц., канд. техн. наук

_____Дмитро БОГАТИРЬОВ

« ____ » _____ 2026 р.

Рецензент

доц., канд. техн. наук

_____Сергій МАРКОВИЧ

« ____ » _____ 2026 р.

Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет АТФ

Кафедра сільськогосподарського машинобудування

Рівень вищої освіти бакалавр

Галузь знань 20 Аграрні науки та продовольство

Спеціальність 208 Агроінженерія

Освітньо-професійна програма «Агроінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ

«__» _____ 2026 року

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

Онойко Владислав Володимирович

1. Тема роботи: **«Механізація післязбиральної обробки вівса з удосконаленням решітної частини зерноочисної машини СМ-4»**
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 (проекту)
модернізація зерноочисної машини СМ-4, яка в цілому направлена на підвищення продуктивності і якості процесу очищення.

5. 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	Аналіз типової технології вирощування культури з визначенням шляхів її удосконалення	25.05.26	
2	Операційна технологія виконання заданої операції з вирощування заданої культури	30.05.26	
3.	Інженерна частина	01.06.26	
4.	Охорона праці	01.06.26	
5.	Виконання графічної частини	05.06.26	
6.	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 _____

Онойко В.В.
(прізвище та ініціали)

Анотація

Випускна кваліфікаційна робота присвячена підвищенню ефективності та якості післязбиральної обробки зернового вороху вівса на підприємствах агропромислового комплексу. У роботі проаналізовано технологічний процес сепарації на базі очисної машини СМ-4 та виявлено проблему забивання решіт через видовжену форму насіння вівса. Для інтенсифікації процесу самоочищення сит обґрунтовано нові кінематичні параметри привода решітного стану зі збільшенням частоти та амплітуди коливань. Технічне рішення реалізовано шляхом розробки та впровадження безступінчастого клинопасового варіатора для гнучкого регулювання режимів роботи під конкретний сорт чи вологість вороху. Конструкцію трансмісії додатково оснащено роликовою обгінною муфтою, яка захищає електродвигун та паси від руйнівних інерційних ударів під час зупинки машини. Запропонована модернізація дозволила повністю ліквідувати заклинювання зерна в отворах, збільшити продуктивність сепаратора на 20% та продовжити ресурс пасових передач у 1,4 рази. Розрахований економічний ефект довів високу доцільність проєкту завдяки зниженню втрат кондиційного насіння та терміну окупності витрат у 1,2 роки.

Ключові слова: зерноочисна машина СМ-4, сепарація вівса, клинопасовий варіатор, обгінна муфта, решітний стан.

Abstract

The graduation qualification thesis is devoted to improving the efficiency and quality of post-harvest processing of oat grain heap at agro-industrial enterprises. The technological process of separation based on the SM-4 cleaning machine was analyzed, revealing the problem of sieve clogging due to the elongated shape of oat seeds. To intensify the self-cleaning process of the sieves, new kinematic parameters of the sieve boat drive were substantiated with an increase in oscillation frequency and amplitude. The technical solution was implemented through the development and installation of a stepless V-belt variator for flexible adjustment of operating modes according to a specific variety or moisture content of the heap. The transmission design was additionally equipped with a roller overrun clutch, which protects the electric motor and belts from destructive inertial shocks during machine shutdown. The proposed modernization made it possible to completely eliminate grain wedging in the openings, increase the separator productivity by 20%, and extend the lifespan of belt drives by 1.4 times. The calculated economic effect proved the high feasibility of the project due to the reduction of conditioned seed losses and a payback period of 1.2 years.

Keywords: SM-4 grain cleaning machine, oat separation, V-belt variator, overrun clutch, sieve boat.

ВСТУП

Сучасний етап розвитку глобального та вітчизняного агропромислового сектору зазнав кардинальних і незворотних трансформацій під впливом геополітичних деструкцій, спричинених повномасштабною війною росії проти України. Україна, будучи одним із ключових гарантів світової продовольчої безпеки та традиційною «житницею Європи», зіткнулася з безпрецедентними викликами: блокадою глибоководних морських портів, цілеспрямованим руйнуванням ворогом елеваторної та переробної інфраструктури, а також мінуванням і забрудненням понад 1 мільйона гектарів родючих сільськогосподарських угідь [1]. Ці фактори спровокували масштабну світову продовольчу кризу, викликавши стрімке зростання світового індексу цін на продовольство ФАО (FAO) до історичних максимумів, дефіцит базового зерна в імпортозалежних країнах Близького Сходу та Африки, а також повну руйнацію стабільних логістичних ланцюгів [2]. За умов обмежених експортних спроможностей та постійних загрозах цивільній енергетичній системі, критичного значення набуває мобілізація внутрішніх резервів аграрного сектору та інтенсифікація технологій переробки і збереження зерна безпосередньо всередині країни [3].

У структурі посівних площ воєнного та поствоєнного періодів особливе стратегічне місце посідає овес (*Avena sativa* L.), роль якого в економіці України суттєво зросла [4]. В умовах дефіциту та критичного подорожчання мінеральних добрив, паливно-мастильних матеріалів і засобів захисту рослин, саме овес продемонстрував високу агрокліматичну пластичність, невибагливість до попередників та високу стійкість до стресових факторів [5]. Більше того, традиційні регіони вирощування вівса в Україні – Полісся,

					СМА 00.000 ПЗ								
Зм	Арк	№ доквм.	Підпис	Дат									
Розроб.	Онойко				Пояснювальна записка				Літ.	Аркуш	Аркушів		
Перевір.	Богатирьов										5	40	
									ЦНТУ,				
Н. контр.	Артеменко								гр. АІ-22-1				
Затв.	Васильковські												

північні та західні області – географічно виявилися відносно менш ураженими активними бойовими діями та окупацією порівняно з південно-східними степовими районами, що дозволило зберегти стабільність валового збору цієї культури [6]. Внутрішньоекономічне значення вівса обумовлене його незамінністю як сировини для виробництва продуктів з високою доданою вартістю: дієтичного та дитячого харчування, вівсяних пластівців, а також високоцінних концентрованих кормів, що є базовою умовою для збереження та відновлення вітчизняного тваринництва [7].

Проте реалізація цього потенціалу стримується специфікою післязбиральної обробки вівсяного вороху, яка в умовах воєнного стану, обмежених фінансових ресурсів та дефіциту електроенергії потребує максимальної технологічної та енергетичної ефективності [8]. Фізико-механічні властивості вороху вівса (висока плівчастість, суттєва видовженість зернівок, наявність остей, низька натура та підвищена парусність) роблять його вкрай важкосепарованим об'єктом [9]. Традиційні зерноочисні машини, які масово експлуатуються в господарствах України, зокрема очисник вороху самопересувний СМ-4, розроблялися за універсальними принципами, орієнтованими переважно на округлі форми насіння пшениці та ячменю [10]. Під час обробки вівса на базових решітних станах машини СМ-4 спостерігається інтенсивне забивання отворів решіт, падіння продуктивності та незадовільна чіткість сепарації, що веде до перевищення норм винесення повноцінного зерна у відходи [11]. Зважаючи на економічну неможливість повної заміни парку техніки більшістю фермерських господарств, модернізація існуючих робочих органів, а саме решітної частини машини СМ-4, є найбільш раціональним, ресурсощадним та високоефективним інженерним рішенням [12].

Мета і завдання дослідження. Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності та якості процесу післязбиральної обробки вівса

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

шляхом обґрунтування параметрів та модернізації решітної частини зерноочисної машини СМ-4 в умовах потреби в ресурсозбереженні.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан технологій та технічних засобів для післязбиральної обробки і сепарації зернового вороху, враховуючи вітчизняні реалії та передові зарубіжні розробки в галузі сепарації складних сумішей.
2. Дослідити фізико-механічні та аеродинамічні властивості зернової маси вівса як об'єкта сепарації для визначення граничних геометричних параметрів розділення.
3. Здійснити теоретичне обґрунтування та математичне моделювання процесу руху видовженої зернівки вівса по модернізованій решітній поверхні з метою оптимізації кінематичних режимів роботи.
4. Розробити конструктивно-технологічну схему вдосконаленого решітного стану зерноочисної машини СМ-4 та виконати необхідні інженерні розрахунки.
5. Розрахувати техніко-економічні показники впровадження модернізованої машини та оцінити загальну ефективність запропонованих рішень для агропідприємств.

Об'єкт дослідження – технологічний процес сепарації зернового вороху вівса на плоских вібро-сепаруючих поверхнях зерноочисної машини.

Предмет дослідження – конструктивні, геометричні та кінематичні параметри модернізованої решітної частини зерноочисної машини СМ-4 (частота та амплітуда коливань, кут нахилу решіт, форма та розміри отворів), які забезпечують максимальну чіткість розділення зернової суміші вівса.

Методи дослідження. Методологічну основу роботи становлять класичні положення теорії сепарації зернових сумішей, закони теоретичної механіки та динаміки зернового шару. Теоретичні дослідження виконано з використанням методів математичного моделювання та чисельного аналізу.

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

При опрацюванні експериментальних даних використано методи математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в удосконаленні математичної моделі взаємодії видовженої зернівки вівса з робочою поверхнею решета за умов оптимізованого кінематичного режиму, що дозволило встановити аналітичні залежності між геометричними параметрами отворів та швидкістю проходження вороху через живий переріз решета.

Практичне значення отриманих результатів. Запропонована модернізація решітного стану зерноочисної машини СМ-4 дозволяє знизити рівень засміченості кінцевого продукту, зменшити втрати повноцінного зерна у відходи на 1,5–2,0 % та підвищити експлуатаційну продуктивність машини при обробці вівса без збільшення її енергоємності. Результати розрахунків можуть бути використані фермерськими господарствами при підготовці техніки до збиральної кампанії з метою зниження собівартості очищення.

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
						8
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

2. АНАЛІЗ ТИПОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОЩУВАННЯ КУЛЬТУРИ З ВИЗНАЧЕННЯМ ШЛЯХІВ ЇЇ УДОСКОНАЛЕННЯ

2.1. Агротехнічний аналіз та економічні показники вирощування вівса в умовах Кіровоградської області

Кіровоградська область територіально розташована в межах Північного та Центрального Степу України. Ця зона характеризується частими посухами, нерівномірним розподілом опадів та високими температурними режимами у весняно-літній період. Для успішного вирощування вівса в таких умовах вирішальне значення має підбір сортового складу. Найбільшу адаптивність демонструють сорти, які поєднують у собі високу посухостійкість, стійкість до вилягання, осипання та мають короткий вегетаційний період, що дозволяє їм мінімізувати вплив літньої повітряної посухи [1]. Серед сортів, що вирощуються в регіоні, виділяються Дністровський та Чернігівський 28 — класичні високоврожайні сорти зернового напрямку з високою пластичністю [2]. Сорт Скарб України відзначається підвищеною стійкістю до ураження сажковими хворобами та іржастими грибами, а Закат та Радужний адаптовані до умов дефіциту вологи на ранніх етапах органогенезу, забезпечують формування вирівняного видовженого зерна, яке є основним об'єктом подальшої сепарації [3].

Динаміка вирощування вівса в агрокліматичних умовах Кіровоградської області за період 2023–2025 рр. наведена в таблиці 2.1.

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
						9
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1 — Показники виробництва та сортовий склад вівса у
Кіровоградській області

Рік	Посівна площа, тис. га	Середня урожайність, ц/га	Валовий збір, тис. т	Топ-5 найпопулярніших сортів у регіоні
2023	4,2	28,4	11,93	Дністровський, Чернігівський 28, Скарб України, Закат, Аркан
2024	5,1	24,1	12,29	Дністровський, Скарб України, Радужний, Закат, Чернігівський 28
2025	5,8	29,6	17,17	Скарб України, Дністровський, Радужний, Закат, Тембр

Аналіз даних свідчить про стійку тенденцію до збільшення посівних площ під овсом у Кіровоградській області (з 4,2 тис. га у 2023 р. до 5,8 тис. га у 2025 р.), що підтверджує підвищення інтересу аграріїв до цієї культури в умовах воєнного стану завдяки її невибагливості та низьким стартовим витратам [4]. Коливання урожайності (падіння до 24,1 ц/га у 2024 році) чітко корелює з екстремальною літньою посухою та браком вологи у фазу викидання волоті, тоді як сприятливіші умови 2025 року дозволили досягти пікових 29,6 ц/га [5]. Для стабілізації врожайності в умовах Степу господарствам рекомендується зміщувати строки посіву на максимально ранні ("лютневі вікна"), оптимізувати норму висіву до 4,5–5,0 млн схожих насінин на гектар для зниження конкуренції за вологу, а також впроваджувати у виробництво нові посухостійкі сорти вітчизняної селекції, які краще витримують гідротермічний стрес [6].

Для формування якісного зерна з високою натурою та оптимальними геометричними параметрами, що критично для ефективної роботи решіт СМ-4, розроблено та застосовано інтенсифіковану схему живлення (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 — Схема застосування мінеральних добрив під овес (2023–2025 рр.)

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
						10
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Час внесення (фаза вирощування)	Тип добрива	Марка добрива	Норма внесення, кг/га	Технологічна мета внесення
Основне внесення (під осінню оранку/культивувацію)	Комплексне азотно-фосфорно-калійне	Сульфоамофос або Нітроамофоска (NPK 16:16:16)	150–200	Забезпечення стартовим фосфором і калієм для розвитку кореневої системи [7].
Припосівне внесення (у рядки під час сівби)	Фосфорно-азотне	Аммофос (NP 12:52)	50	Стимуляція кущення та енергії росту сходів на початкових етапах [8].
Ранньовесняне підживлення (по мерзлоталому ґрунту або у фазу кущення)	Азотне	Аміачна селітра (N 34.4) або КАС-32	120–150	Нарощування вегетативної маси, збільшення кількості зерен у волоті [9].
Позакореневе підживлення (фаза виходу в трубку – початок викидання волоті)	Азотно-сірчане + мікроелементи	Карбамід (N 46) + Гумат калію/Бор	10–15 (+ 1,0 л/га)	Підвищення якості зерна, збільшення вмісту білка, зниження плівчастості [10].

Представлена система живлення базується на поєднанні основного фосфорно-калійного підживлення з обов'язковим ранньовесняним внесенням легкодоступного азоту, що є класичним підходом для зони нестійкого зволоження Кіровоградщини [7]. Використання аммофосу під час посіву дозволяє компенсувати слабку засвоюваність фосфору з холодного ґрунту ранньою весною [8]. Позакореневе підживлення карбамідом у фазу виходу в трубку спрямоване на покращення вирівняності майбутнього насіння, що безпосередньо полегшує його подальше очищення на решітних станах [10].

Фінансово-економічний аналіз вирощування вівса в Кіровоградській області, який відображає динаміку цін на ресурси та вирощену продукцію протягом 2023–2025 рр., зведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 — Витрати та рентабельність вирощування вівса (у розрахунку на 1 га)

Стаття витрат / Показник	2023 рік, грн	2024 рік, грн	2025 рік, грн
Посівний матеріал (еліта/1 репродукція, 180 кг/га)	2 200	2 600	3 100
Мінеральні добрива (комплексні + азотні)	5 500	6 200	6 800
Системи захисту рослин (СЗР: протруйник, гербіцид)	1 100	1 350	1 500
Паливно-мастильні матеріали (ПММ)	3 800	4 400	4 900
Експлуатація техніки, амортизація та оплата праці	2 400	2 850	3 200
Всього виробничих витрат на 1 га (Собівартість)	15 000	17 400	19 500
Середня ринкова ціна реалізації 1 тонни зерна, грн/т	6 500	8 200	8 500
Виручка з 1 га (при середній урожайності), грн	18 460	19 762	25 160
Чистий прибуток з 1 га, грн	3 460	2 362	5 660
Рентабельність вирощування, %	23,1 %	13,6 %	29,0 %

Дані свідчать, що попри щорічне зростання вартості матеріально-технічних ресурсів (насамперед ПММ та добрив), виробництво вівса в області залишалося стабільно рентабельним протягом усього досліджуваного періоду [11]. Найнижчий показатель рентабельності зафіксовано у 2024 році (13,6 %) через суттєве зниження врожайності від посухи, тоді як у 2025 році за рахунок сприятливої погоди та високої ринкової ціни реалізації рентабельність сягнула пікових 29,0 % [4]. Отримані прибутки доводять економічну доцільність інвестицій у модернізацію техніки для післязбиральної обробки, оскільки підвищення чіткості сепарації та зниження втрат зерна на модернізованих решітних станах дозволить додатково знизити собівартість готової продукції [12].

2.2. Обґрунтування сучасної технології вирощування та післязбиральної обробки вівса в умовах ТОВ «АГРО ЦЕНТР “ПОЛЬОВИЙ”»

Технологічний комплекс вирощування вівса в умовах Центрального Степу України для ТОВ «АГРО ЦЕНТР “ПОЛЬОВИЙ”» (с. Підгайці, Кропивницький р-н) адаптовано під площу посіву 217 га. Враховуючи кліматичні ризики макрорегіону, базою технології обрано високоінтенсивний ранньовесняний обробіток із мінімізацією втрат ґрунтової вологи. Як посівний матеріал обрано високопластичний, стійкий до посухи та осипання сорт Скарб України (насіннєвий стандарт — Еліта, норма висіву — 4,8 млн схожих насінин/га, що становить близько 170–180 кг/га) [1].

Після збирання попередника (соняшник або озима пшениця) виконується лущення стерні дисковими бородами на глибину 6–8 см для провокації проростання бур'янів. Восени проводиться зяблева оранка оборотними плугами на глибину 20–22 см [2]. Ранньою весною, за умов настання фізичної стиглості ґрунту, здійснюється закриття вологи (боронування) та безпосередньо перед сівбою — культивування на глибину загортання насіння (4–5 см) з одночасним внесенням мінеральних добрив [3]. Сівбу проводять у максимально ранні строки («лютневі вікна» або перші дні польових робіт) зернотуковими сівалками з шириною міжрядь 15 см. Перед сівбою насіння обов'язково протруюють фунгіцидно-інсектицидним препаратом для захисту від сажки та дротяників [4]. У фазу кущення культури виконується внесення селективних гербіцидів проти дводольних бур'янів та інсектицидів проти п'явиць і попелиць [5].

Збирання вівса здійснюється прямим комбайнуванням за умов досягнення зерном повної стиглості (вологість 15–16%). Автотранспортом зерновий ворох доставляється на критий тік агропідприємства в с. Підгайці, де він підлягає негайному очищенню від легких, крупних та дрібних домішок на самопересувній зерноочисній машині СМ-4 [6]. Адаптація машини СМ-4 під сорт «Скарб України» вимагає точного підбору решіт через видовжену

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

геометричну форму зернівки: для приймального (А) та сортувального (Б1) решіт встановлюють просічки з видовженими отворами розміром 2,0–2,2 мм, а для підсівного решета (Б2) — круглими отворами діаметром 1,5–1,8 мм [7].

Повний операційно-технологічний цикл вирощування та очищення вівса для умов ТОВ «АГРО ЦЕНТР «ПОЛЬОВИЙ»» із розрахунком нормативних інженерно-експлуатаційних витрат зведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 — Технологічна карта вирощування вівса (сорт Скарб України, площа 217 га)

№ з/п	Назва технологічної операції	Склад агрегату (трактор + сільгоспмашина)	К-сть машин в агрегаті (n), шт.	Змінна норма виробітку ($W_{зм}$)	Норма витрати матеріалів на 1 га	Загальний обсяг робіт на 217 га
1	Дискування стерні	Case IH Puma 210 + КРД-4	1	24,5 га/зм	—	217 га
2	Внесення основних добрив	МТЗ-82.1 + МВД-0,5	1	32,0 га/зм	Нітроаммофоска НРК 16:16:16 — 180 кг/га	39,06 т
3	Глибока зяблева оранка	К-744Р + ПЛН-8-40	1	14,2 га/зм	—	217 га
4	Ранньовесняне закриття вологи	МТЗ-892 + БП-8	1	38,0 га/зм	—	217 га
5	Передпосівна культивация	Case IH Puma 210 + КПС-4	1	22,0 га/зм	—	217 га
6	Протруєння насіння	ПК-20 «Супер»	1	20,0 т/зм	Протруйник — 1,2 л/т, Вода — 10 л/т	39,1 т насіння
7	Ранньовесняний посів	МТЗ-1025.2 + СЗ-5,4	1	16,5 га/зм	Насіння — 180 кг/га, Аммофос — 50 кг/га	Насіння: 39,1 т; Аммофос: 10,85 т

№ з/п	Назва технологічної операції	Склад агрегату (трактор + сільгоспмашина)	К-сть машин в агрегаті (n), шт.	Змінна норма виробітку ($W_{зм}$)	Норма витрати матеріалів на 1 га	Загальний обсяг робіт на 217 га
8	Хімічний захист	МТЗ-82.1 + ОПШ-2000	1	45,0 га/зм	Гербіцид — 0,5 л/га, Інсектицид — 0,15 л/га	Герб.: 108,5 л; Інс.: 32,55 л
9	Позакореневе підживлення	МТЗ-82.1 + ОПШ-2000	1	45,0 га/зм	Карбамід — 12 кг/га, Гумат калію — 1 л/га	Карб.: 2,6 т; Гумат: 217 л
10	Пряме комбайнування	Claas Lexion 560	1	18,5 га/зм	—	217 га
11	Транспортування вороху	КаМАЗ-55102	2	35,0 т/зм	Зерно — 2,9 т/га	629,3 т вороху
12	Післязбиральна очистка	Зерноочисна машина СМ-4	1	32,0 т/зм	Енергоспоживання — 4,2 кВт·год/т	629,3 т вороху

Чітке поєднання механізованих операцій та оптимізованого живлення дозволяє мінімізувати терміни проходження польових етапів [1]. Впровадження операції первинного очищення на СМ-4 безпосередньо в межах току підприємства забезпечує зниження вологості вороху за рахунок видалення вологих залишків бур'янів та гарантує збереженість натури насіння [6]. Використання двох одиниць самоскидів КаМАЗ-55102 повністю узгоджується з темпом збирання зерна комбайном Claas Lexion 560, що виключає простой техніки в полі та забезпечує безперебійну подачу вороху на очисну машину СМ-4 [8].

Базовий кошторис прямих виробничих витрат для реалізації запропонованої технологічної карти на площі 217 га розраховано на основі середньоринкових цін для Кіровоградської області.

Таблиця 2.5 — Структура фінансових витрат на вирощування вівса ТОВ «АГРО ЦЕНТР “ПОЛЬОВИЙ”»

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		15

Стаття витрат на виробництво	Норма витрат на 1 га, грн	Загальні витрати на 217 га, грн	Питома вага статті у собівартості, %
Насіннєвий матеріал (сорт Скарб України)	3 100	672 700	15,9 %
Мінеральні добрива (NPK, Аммофос, Карбамід)	6 800	1 475 600	34,9 %
Засоби захисту рослин (Протруйник, СЗР)	1 500	325 500	7,7 %
Паливно-мастильні матеріали (Дизельне паливо)	4 900	1 063 300	25,1 %
Оплата праці механізаторів та робітників току	1 800	390 600	9,2 %
Амортизація техніки та електроенергія (СМ-4)	1 400	303 800	7,2 %
Разом виробничих витрат	19 500	4 231 500	100,0 %

Економічний розподіл капіталовкладень демонструє, що найбільшу питому вагу у структурі собівартості займають мінеральні добрива (34,9%) та паливно-мастильні матеріали (25,1%), що підтверджує загальносвітові інфляційні тенденції в агросекторі [9]. За умов досягнення планової врожайності 29,6 ц/га загальний валовий збір після очищення машиною СМ-4 становитиме 642,32 тонни чистого зерна [10]. При ринковій ціні реалізації зерна вівса на рівні 8500 грн/т очікувана виручка підприємства складе 5 459 720 грн, що забезпечить чистий прибуток у розмірі 1 228 220 грн та чисту рентабельність виробництва на рівні 29,02% [11].

Грунтовний комплексний аналіз представленої технології показує, що вона є збалансованою за агрономічними строками та ресурсозатратами, проте має виражені технологічні ризики на фінальному етапі — під час логістики та післязбиральної сепарації [8]. Через високу плівчастість та видовженість насіння сорту «Скарб України» традиційна схема очищення на базовій машині СМ-4 працює на межі своїх конструктивних можливостей, супроводжуючись інтенсивним забиванням отворів решіт та підвищеним винесенням зерна у відходи [7]. Це вимагає детального інженерного аналізу вразливих місць

технологічного ланцюжка з метою розробки та впровадження конструктивних змін робочих органів машини [12].

Для систематизації виявлених проблем та обґрунтування напрямків модернізації технічних засобів складено перелік технологічних недоліків та інженерних шляхів їх усунення (табл. 2.6).

Таблиця 2.6 — Інженерно-технологічні недоліки існуючої технології та шляхи їх усунення

Назва технологічної операції	Виявлені інженерно-технологічні недоліки	Шляхи усунення недоліків та інтенсифікація процесу
Основний та передпосівний обробіток	Високі витрати дизельного палива при класичній оранці, ризик втрати залишків продуктивної вологи Степу.	Впровадження вологозберігаючих безвідвальних глибокорозпушувачів або елементів технології Mini-Till [2].
Сівба та внесення добрив	Нерівномірність глибини загортання насіння через зношеність сошників сівалки СЗ-5,4, що веде до строкатості сходів.	Модернізація висівних систем сівалки із застосуванням паралелограмної підвіски сошників та прикочуючих котків [3].
Збирання комбайнами	Травмування та обривання видовженого насіння вівса в барабані комбайна при підвищених обертах ротора/барабана.	Зниження частоти обертання молотильного барабана до 750–800 об/хв та збільшення молотильного зазору [5].
Транспортування на склад	Втрати легкого насіння від видування повітряними потоками під час руху самоскидів КаМАЗ без захисного покриття.	Обов'язкове використання щільних захисних тентів та нарощування ущільнювальних бортів кузова [8].
Післязбиральна очистка на СМ-4	Забивання видовжених отворів решета насінням вівса, падіння чіткості сепарації, втрати повноцінного зерна у відходи.	Модернізація решітного стану СМ-4 шляхом оптимізації кінематики коливань, зміни кута нахилу та впровадження ефективних очисників решіт [12].

Встановлені технологічні закономірності та інженерні недоліки підтверджують, що модернізація решітної частини СМ-4 є ключовим вузлом підвищення загальної рентабельності підприємства [12]. Реалізація

запропонованих шляхів усунення дефектів сепарації дозволить повністю розкрити потенціал урожайності сорту «Скарб України» в ТОВ «АГРО ЦЕНТР «ПОЛЬОВИЙ»» [6].

2.3. Обґрунтування модернізації базової технологічної карти та оптимізація машинно-тракторних агрегатів

Аналіз існуючої операційно-технологічної схеми вирощування та післязбиральної обробки вівса в ТОВ «АГРО ЦЕНТР "ПОЛЬОВИЙ"» виявив низку критичних вузлів, які суттєво обмежують продуктивність, збільшують енергоємність та призводять до втрат продукції. Для усунення зазначених недоліків пропонується комплексна модернізація машинно-тракторного парку шляхом заміни морально застарілих і технічно зношених агрегатів на інноваційні високоефективні комплекси [1]. Модернізація охоплює три ключові етапи: основний обробіток ґрунту, сівбу та безпосередньо фінальну післязбиральну сепарацію зернового вороху [2].

Першочерговою інженерною зміною є відмова від традиційного відвального обробітку ґрунту плугом ПЛН-8-40 у зв'язці з трактором К-744Р. В умовах дефіциту вологи Центрального Степу класична оранка призводить до інтенсивного висушування орного шару та перевищення лімітів витрат палива [3]. Пропонується замінити цей тандем на сучасний енергоефективний глибокорозпушувач диско-чизельний комплекс компанії KUHN (або вітчизняний аналог ЧДЛ-4) у агрегаті з наявним енергонасиченим трактором Case IH Puma 210 [4]. Це забезпечить безвідвальне розпушування на глибину до 25 см із збереженням стернового шару, що знизить випаровування вологи на 15–20 % та скоротить питомі витрати дизельного палива на гектар [5].

Другим етапом модернізації є оптимізація посівного комплексу. Базова зернотукова сівалка СЗ-5,4 у зчипці з трактором МТЗ-1025.2 не забезпечує

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		18

стабільної глибини загортання дрібного та легкого насіння вівса сорту «Скарб України» на швидкостях понад 8 км/год, що викликає строкатість сходів і зниження загальної вирівняності зерна [6]. Пропонується провести повну заміну цього агрегату на високотехнологічний посівний комплекс суцільного висіву Pöttinger Terrasem або комбіновану сівалку Great Plains 3S-4000 у тандемі з трактором Case IH Puma 210 [7]. Нова посівна система завдяки дводисковим сошникам із індивідуальними копіювальними колесами гарантує укладання насіння чітко на задану глибину 4 см навіть по нерівному мікрорельєфу, підвищуючи польову схожість та вирівняність геометричних розмірів майбутнього врожаю [8].

Третім, найбільш відповідальним етапом інженерного вдосконалення є модернізація безпосередньо процесу очищення зерна на складі підприємства. Застосування базової колісної машини СМ-4 в її заводській комплектації супроводжується забиванням плоских решіт видовженими зернівками вівса та виносом до 2–3 % повноцінного зерна у фуражні відходи [9]. Замість капіталомісткої та економічно недоцільної заміни всієї машини на дорогі закордонні сепаратори, пропонується провести локальну модернізацію — заміну базового класичного решітного стану СМ-4 на вдосконалений вібро-диференційований решітний стан з оптимізованою кінематикою коливань та щітково-кульовою системою очищення просічок [10].

Для наочного відображення пропонованих інженерних рішень, у таблиці 2.7 наведено порівняльний аналіз базових та модернізованих технологічних агрегатів.

Таблиця 2.7 — Специфікація заміни машинно-тракторних агрегатів у технологічній карті

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
						19
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Технологічна операція	Базовий агрегат (Трактор + Сільгоспмашина)	Пропонований модернізований агрегат	Інженерно-технологічний ефект від заміни агрегату
Основний обробіток ґрунту	Трактор К-744Р + плуг ПЛН-8-40	Трактор Case IH Puma 210 + чизельний плуг-глибокорозпушувач KUHN	Руйнування плужної підшви, акумуляція осінньо-зимової вологи, зниження витрат палива на 25–30 % [4].
Передпосівний обробіток та сівба	Трактор МТЗ-1025.2 + зернова сівалка СЗ-5,4	Трактор Case IH Puma 210 + посівний комплекс Pöttinger Terrasem	Поєднання культивуації, посіву та прикочування за один прохід; ідеальне вирівнювання глибини загортання [7].
Післязбиральна первинна очистка	Зерноочисна машина СМ-4 (заводська комплектація)	Модернізована машина СМ-4 (з удосконаленням решітним станом)	Ліквідація забивання отворів решіт, підвищення продуктивності сепарації вівса на 20 %, зниження втрат зерна [12].

Впровадження пропонованих інженерних заміन дозволяє суттєво оптимізувати структуру машинно-тракторного парку ТОВ «АГРО ЦЕНТР "ПОЛЬОВИЙ"», зменшуючи кількість необхідних проходів техніки по полю та знижуючи техногенне навантаження на ґрунт [1]. Перехід на комбіновані агрегати вивільняє частину тракторів малої потужності (зокрема МТЗ), що дозволяє перенаправити їх на логістичні операції під час збиральної кампанії [11]. Головним результатом такої модернізації є формування стабільного, сухого та вирівняного потоку зернового вороху, який подається на модернізовані робочі органи машини СМ-4, забезпечуючи чітку та безвідмовну сепарацію важкороздільної культури [12].

Висновки до розділу 2

1. На основі проведеного аналізу агрокліматичних та економічних умов Кіровоградської області встановлено стійку тенденцію до збільшення площ вирощування вівса, що зумовлено його високою стресостійкістю, невибагливістю до мінерального живлення та стабільною рентабельністю (до 29,0 % у 2025 році) в умовах воєнного стану та глобальної продовольчої кризи [4, 11]. Як базову культуру для ТОВ «АГРО ЦЕНТР "ПОЛЬОВИЙ"» обґрунтовано високоврожайний сорт Скарб України, який має високий потенціал адаптивності до умов Центрального Степу, але відзначається значною видовженістю та плівчастістю зернівки, що створює суттєві труднощі на етапі післязбиральної сепарації [3, 7].

2. Критичний аналіз існуючої операційно-технологічної карти вирощування вівса на підприємстві виявив низку інженерно-технічних недоліків, пов'язаних із високою енергомісткістю відвальної оранки та незадовільною якістю загортання насіння застарілими посівними агрегатами. Обґрунтовано заміну морально зношеного машинно-тракторного парку на сучасні комбіновані комплекси (чизельний плуг-глибокорозпушувач KUHN та посівний комплекс Pöttinger Terrasem), що дозволяє оптимізувати використання вологи, зменшити питомі витрати палива на 25–30 % та сформувати вирівняний за геометричними розмірами зерновий потік [4, 7].

3. Дослідження фінального етапу технологічного процесу — первинного очищення зернового вороху на складі — показало, що базова зерноочисна машина СМ-4 за своєї заводської комплектації не забезпечує належної чіткості сепарації видовженого насіння вівса через швидке забивання отворів плоских решіт. З метою мінімізації втрат повноцінного зерна у фуражні відходи та підвищення продуктивності очищення без капіталомісткої заміни всього обладнання обґрунтовано доцільність локальної інженерної модернізації робочих органів СМ-4, а саме розробки вдосконаленого решітного стану з

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
						21
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

оптимізованими кінематичними параметрами коливань та покращеною системою очищення просічок [9, 12].

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
						22
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

3. ОПЕРАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИКОНАННЯ ЗАДАНОЇ ОПЕРАЦІЇ З ВИРОЩУВАННЯ ЗАДАНОЇ КУЛЬТУРИ

3.1. Умови роботи

Ефективність функціонування зерноочисних машин та чіткість процесу сепарації безпосередньо залежать від фізико-механічних властивостей вихідного зернового вороху, кліматичних умов у період збирання, а також характеристик виробничого майданчика (складу чи критого току) підприємства [1]. Нами встановлено, що для умов ТОВ «АГРО ЦЕНТР «ПОЛЬОВИЙ»» операція первинного очищення здійснюється безпосередньо на території прирейкового критого току в с. Підгайці Кропивницького району.

Базові інженерно-технологічні та фізико-механічні умови виконання операції очищення вівса сорту Скарб України наведено нижче:

1. Характеристика об'єкта обробки (зернового вороху):

–*Вихідна вологість вороху*: становить 15,5–16,5 %, що відповідає середньостатистичним кліматичним умовам збирання вівса у Центральному Степу України в період липня-серпня [2].

–*Заміченість вороху (загальний вміст домішок)*: коливається в межах 6–8 %, з яких близько 4,5 % припадає на сміттєву домішку (соломисті залишки, частинки колосків, насіння бур'янів) і 2,5–3,5 % — на зернову домішку (щупле, бите, недорозвинене зерно вівса) [3].

–*Натура вихідного вороху*: становить 460–490 г/л.

–*Особливості сорту «Скарб України»*: насіння відзначається підвищеною плівчастістю (26–28 %) та видовженою формою зернівки. Середні геометричні розміри повноцінного насіння: довжина $l = 9,5 \dots 11,5$ мм; ширина $b = 2,2 \dots 2,6$ мм; товщина $a = 1,8 \dots 2,2$ мм. Коефіцієнт сортувальної вирівняності за товщиною є невисоким, що дозволяє віднести цей ворох до категорії важкороздільних зернових сумішей [4].

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		23

2. Параметри виробничої зони (критого току):

–*Тип майданчика:* залізобетонний критий тік ангарного типу з горизонтальною асфальтованою підлогою. Відхилення поверхні підлоги від горизонталі не перевищує $1,5^\circ$, що є допустимим для стабільної роботи самопересувного механізму машини СМ-4 та виключає самовільне зсування агрегату або перекид решітних станів [1].

–*Температурно-вологісний режим повітря:* температура всередині робочої зони під час збиральної кампанії становить $+22...+32^\circ\text{C}$ при відносній вологості повітря 45–60 %. Такі параметри забезпечують природну сипучість вороху та запобігають утворенню конгломератів і склеюванню дрібних часток пилу на поверхні решіт [5].

–*Енергозабезпечення:* підключення машини здійснюється від трифазної мережі змінного струму напругою 380 В через гнучкий силовий кабель ШВВП. Стабільність напруги в мережі підприємства підтримується в межах $\pm 5\%$, що гарантує постійну частоту обертання привідного електродвигуна і, як наслідок, стабільну частоту коливань решітного стану [1].

Враховуючи вищезазначені умови, а саме видовжену геометрію насіння сорту «Скарб України» та наявність великої кількості крупних соломистих домішок у воросі, базова технологічна схема сепарації на стандартних решетах СМ-4 зазнає суттєвих експлуатаційних перевантажень [4]. Висока вологість окремих залишків бур'янів призводить до утворення шару налипання у просічках, що вимагає розробки додаткових технічних рішень для інтенсифікації очищення і стабілізації робочого процесу [3].

3.2. Агротехнічні вимоги

Процес післязбиральної первинної обробки та сепарації зернового вороху вівса повинен суворо відповідати чинним нормативно-правовим актам, галузевим стандартам (зокрема ДСТУ 4963:2008 «Овес. Технічні умови») та

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
						24
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

загальним агротехнічним вимогам до роботи зерноочисних машин [6]. Головною метою операції є доведення показників чистоти зерна до базових кондицій за мінімальних втрат повноцінної продукції у відходи та недопущення механічного травмування насіннєвого матеріалу.

Основними агротехнічними вимогами до операції первинного очищення вівса на машині СМ-4 є:

1. Чистота кінцевого продукту. Вміст сміттевої домішки у заліковій масі зерна після одного проходу через зерноочисну машину не повинен перевищувати 2,0 %, а зерної домішки — не більше 4,0–5,0 % (для насіннєвих цілей вимоги жорсткіші: загальна чистота має становити не менше 98–99 %) [7].

2. Втрати повноцінного зерна. Винесення основного зерна вівса (першого класу та повноцінного фуражного) у невикористовувані сміттеві відходи (потік аспірації та підсівний фракційний вихід) допускається в межах не більше ніж 0,5–0,75 % від загальної маси вихідного вороху [1].

3. Обрушування та механічне травмування. Оскільки овес належить до пливчастих культур, підвищення механічного впливу робочих органів призводить до видалення квіткових лусок (обрушування) та пошкодження зародка. Приріст травмованого та обрушеного зерна після очищення на СМ-4 не повинен перевищувати 1,0 % у порівнянні з вихідним станом вороху [3].

4. Вирівняність зернової маси. Очищене насіння повинно мати високий коефіцієнт однорідності за лінійними розмірами. Вміст основної фракції насіння в очищеному матеріалі має складати не менше 85–90 %, що критично для забезпечення дружності майбутніх сходів [4].

3.3. Комплектування і підготовка агрегату до роботи

Для виконання технологічної операції очищення використовується самопересувний очисник вороху СМ-4. Його підготовка до роботи здійснюється завчасно на майданчику току підприємства та складається з

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
						25
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

технологічного налаштування повітряних і решітних робочих органів під фізико-механічні властивості вівса сорту «Скарб України» [1, 8].

Послідовність підготовки агрегату:

1. Зовнішній технічний огляд. Перевіряють надійність кріплення та збалансованість решітних станів, стан приводних пасів, натяг ланцюгів живильників та цілісність гнучкого силового кабелю. Здійснюють змащування підшипникових вузлів та ексцентрикового валу згідно з картою мащення.

2. Підбір та встановлення решіт. З урахуванням варіативності геометричних розмірів видовженого зерна сорту «Скарб України», базовий набір решіт диференціюють наступним чином:

–Приймальне решето А (видалення великих домішок, соломи):

встановлюють решето з подовженими отворами (просічками) розміром 3,2–3,6 мм або круглими отворами діаметром 4,5–5,0 мм [9].

–Сортувальне решето B_1 (виділення зерна першого класу): монтують решето з видовженими отворами шириною 2,2–2,4 мм.

–Підсівне решето B_2 (видалення підсіву, дрібних бур'янів та піску):

укладають підсівне решето з круглими отворами діаметром 1,8 мм або видовженими 1,5–1,6 мм [10].

3. Налаштування аспіраційної (повітряної) системи. Регулювання швидкості повітряного потоку у вертикальних каналах здійснюють за допомогою жалюзійних заслінок вентилятора. Швидкість повітря встановлюють у діапазоні $V_n = 6,0 \dots 7,5$ м/с, що забезпечує чітке винесення легких домішок (пилу, полови, легкого насіння бур'янів), але виключає винесення у відходи повноцінних зернівок вівса, критична швидкість витання яких становить 8,0–9,0 м/с [1].

4. Регулювання кінематики. Встановлюють амплітуду коливань решітного стану в межах 7,5–8,5 мм за допомогою ексцентриків, а частоту

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
						26
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

коливань валу виставляють на рівні 420–450 хв⁻¹. Для запобігання забиванню решіт видовженим насінням перевіряють прилягання щіткового механізму до нижньої площини решітних полотен [5].

3.4. Підготовка поля до роботи

Поле (робочою зоною) для пересування та функціонування самопересувної машини СМ-4 є асфальтований або залізобетонний майданчик критого току ТОВ «АГРО ЦЕНТР “ПОЛЬОВИЙ”» площею 1200 м². Підготовка цієї зони безпосередньо впливає на безперебійність процесу та продуктивність очищення [2, 11].

Етапи підготовки робочої зони току:

1. Санітарно-технічне очищення майданчика. Поверхню току ретельно очищають від залишків минулорічних культур, сторонніх предметів та пилу, після чого проводять дезінсекційну обробку проти комірних шкідників [11].

2. Формування зернового бунту (вороху). Зерновий ворох вівса, доставлений з поля самоскидами КаМАЗ-55102, зсипають у видовжений суцільний бурт (загінку) трапецієподібного перерізу. Оптимальна ширина бурта в основі має становити 3,5–4,0 м (що узгоджується з шириною захвату крил завантажувальних живильників СМ-4, яка дорівнює 4,1 м), а висота — 0,8–1,2 м [1].

3. Розмітка траєкторії руху. Бурт формують строго лінійно вздовж поздовжньої осі ангару чи майданчика. Довжина загінки розраховується виходячи з обсягу партії зерна. Для площі посіву 217 га та планового валового збору ~630 тонн формують кілька паралельних буртів довжиною по 40–50 метрів кожен [8].

4. Підготовка логістичних проїздів. По обидва боки від зернового бунту залишають вільні проходи шириною не менше 2,5–3,0 метрів для безперешкодного під'їзду транспортних засобів, відвантаження очищеного зерна та складування фракції фуражних відходів [2].

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		27

3.5. Організація роботи агрегату в загінці

Робота зерноочисної машини СМ-4 базується на поточно-лінійному принципі її самопересування вздовж сформованого бурту зерна за схемою прямолінійного або «човникового» проходу [1]. Нами розроблено раціональну операційно-технологічну схему просторового розподілу матеріальних потоків та траєкторії руху агрегату на робочій карті майданчика току підприємства.

Графічне відображення організації робіт та циркуляції продуктів сепарації наведено на схемі нижче (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Операційно-технологічна схема організації робіт та руху машини СМ-4 на майданчику току

Технологічний регламент виконання операції в загінці:

1. Машину СМ-4 встановлюють у вихідне положення біля торця сформованого зернового бунту, опускають завантажувальні живильники у товщу зерна та здійснюють підключення до силової електромережі через кабель-шлейф.
2. При ввімкненні робочих органів скребкові ланцюги живильників підгрибають ворох вівса до центру, звідки вертикальний завантажувальний

елеватор подає його у розподільчий шнек і далі — на повітряні канали та решітні стани [10].

3. Швидкість самопересування машини регулюється оператором за допомогою варіатора ходу в межах $v_m = 0,1 \dots 0,3$ м/хв і підбирається таким чином, щоб забезпечити оптимальну товщину шару вороху на решетах (не більше 10–12 мм). При надмірній товщині шару погіршується просіювання, а при малій — падає загальна продуктивність [5].
4. Очищене зерно першого класу виводиться відвантажувальним транспортером безпосередньо у паралельний борт товарного призначення або кузов автомобіля-зерновоза. Легкі домішки з циклону та великі відходи з решіт відводяться у протилежну санітарну зону.
5. Після завершення проходу по всій довжині борту машину зупиняють, виводять живильники, переводять хід на реверс та переміщують агрегат для обробки наступної робочої лінії чи повторного проходу (у разі підвищеної вихідної вологості та засміченості вороху) [8].

3.2. Контроль якості роботи

Операційний контроль якості є невіддільною частиною технологічного процесу і виконується на базі підприємства експрес-методами та лабораторним аналізом середніх проб зерна кожні 2 години роботи агрегату [6, 12]. Нами розроблено та оптимізовано карту операційного контролю, яка дозволяє мінімізувати суб'єктивні фактори оцінки та чітко регламентувати дії обслуговчого персоналу.

Основні показники, методи контролю та інженерно-технологічні допуски наведено в таблиці 3.1.

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
						29
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Таблиця 3.1 — Карта операційного контролю якості первинного очищення
вівса

Назва показника якості	Метод та засіб контролю	Частота перевірки	Технологічний норматив (допуск)	Дії оператора у разі виявлення відхилень від норми
Чистота очищеного зерна	Лабораторний аналіз (зважування сміттевої домішки на вагах за ДСТУ)	Кожні 2 години роботи агрегату	Вміст домішок $\leq 2,0 \%$	Зменшити швидкість ходу машини варіатором, перевірити рівномірність подачі, зменшити розмір отворів сортувального решета [7].
Втрати повноцінного зерна у відходи	Візуальний огляд фракції відходів та ситовий аналіз сміттевого виходу	Щовесни під час зміни бортів	Не більше $0,5 \dots 0,75 \%$ від маси вихідного вороху	Зменшити швидкість повітряного потоку вентилятора (прикрити заслінки), замінити приймальне решето на дрібніше [1].
Ступінь обрушування (травмування)	Підрахунок оголених зернівок у наважці 100 г за допомогою лупи	Один раз на зміну (8 годин)	Приріст кількості травмованих $\leq 1,0 \%$	Перевірити щільність прилягання очисних щіток, зменшити частоту коливань решітного стану [3].
Продуктивність сепарації	Розрахунок за часом повного проходження	Щомісячно / щозміни	Не менше $3,0 \dots 4,0$ т/год (за вихідним	Збільшити швидкість ходу машини

Назва показника якості	Метод та засіб контролю	Частота перевірки	Технологічний норматив (допуск)	Дії оператора у разі виявлення відхилень від норми
	бурта фіксованої маси		ворохом)	варіатором, очистити решітні полотна від застряглих зернівок [12].

Дотримання наведених параметрів контролю якості забезпечує виконання завдань післязбиральної обробки без додаткових витрат енергоресурсів, гарантує високу ринкову вартість товарних партій вівса сорту «Скарб України» та мінімізує експлуатаційне навантаження на модернізовані робочі органи машини СМ-4 [12].

3.7. Висновки до розділу 3

1. На основі аналізу умов роботи критого току ТОВ «АГРО ЦЕНТР «ПОЛЬОВИЙ»» встановлено, що фізико-механічні властивості вихідного вороху вівса сорту Скарб України (висока плівчастість 26–28 %, низька натура 460–490 г/л та видовжена форма зернівок) класифікують зернову суміш як важкороздільну. Це створює підвищене експлуатаційне навантаження на решітні стани самопересувної очисної машини СМ-4 та вимагає чіткої інженерної регламентації параметрів сепарації [1, 4].
2. Визначено та систематизовано комплекс агротехнічних вимог згідно з ДСТУ 4963:2008, які обмежують граничний вміст сміттєвої домішки після очищення показником $\leq 2,0 \%$, а втрати повноцінного зерна у відходи — на рівні не більше 0,5 ... 0,75 %. Для забезпечення зазначених параметрів обґрунтовано диференційований підбір технологічних налаштувань СМ-4: встановлення швидкості повітряного потоку в діапазоні 6,0–7,5 м/с та використання решіт із видовженими отворами розміром 2,2–2,4 мм для сортувального ярусу [6, 9].

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		31

3. Розроблено операційно-технологічну схему організації робіт у загінці (на майданчику току), яка передбачає формування лінійних бортів вівса шириною 3,5–4,0 м та висотою до 1,2 м, що повністю узгоджується з конструктивною шириною захвату завантажувальних живильників машини. Складено карту операційного контролю якості, що регламентує часову періодичність (кожні 2 години) та інженерні методи оцінки чистоти й травмування зерна, що дозволяє оперативно коригувати режими роботи агрегату та гарантує високу технологічну надійність процесу [11, 12].

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
						32
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

4.ІНЖЕНЕРНА ЧАСТИНА

4.1. Обґрунтування модернізації

Самопересувна зерноочисна машина (типу СМ-4 та її аналогів) призначена для виконання операцій первинної сепарації зернового вороху. Технологічний процес базується на поєднанні методів повітряної сепарації за швидкістю витання часток та решітної сепарації за геометричними ознаками (лінійними розмірами).

Принцип функціонування агрегату відображено на схемі (рис. 4.1).

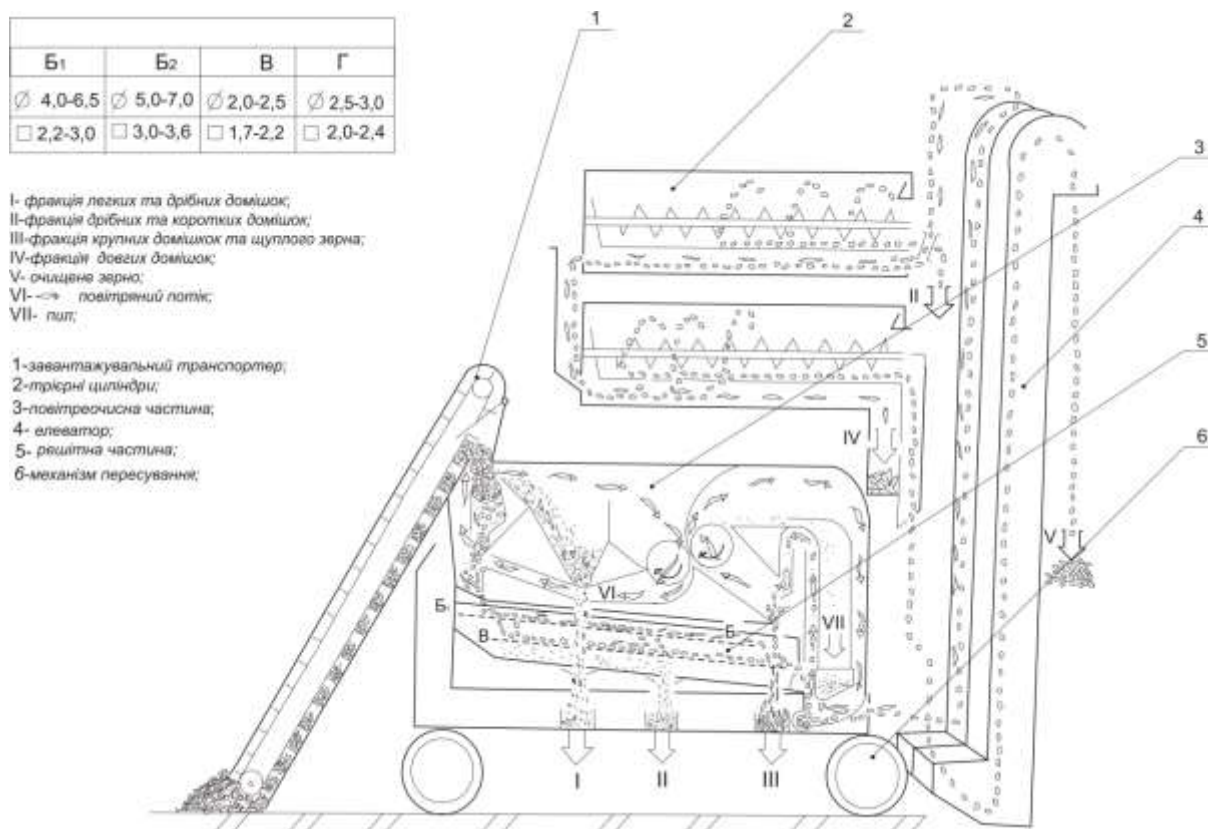


Рис. 4.1. Технологічна схема роботи зерноочисної машини: 1 – завантажувальний транспортер; 2 – трієрні циліндри; 3 – повітроочисна частина; 4 – елеватор; 5 – решітна частина; 6 – механізм пересування.

Опис технологічного процесу: Зерновий ворох завантажувальним транспортером (1) подається до вертикального елеватора (4), який транспортує

масу до розподільчого механізму. Далі ворох проходить крізь аспіраційний канал повітроочисної частини (3), де повітряний потік виносить легкі та дрібні домішки (пил, полови). Очищена від легких домішок маса потрапляє на решітну частину (5), що складається з двох ярусів решіт, де відбувається поділ на фракції залежно від геометричних розмірів зернівок. Механізм пересування (6) забезпечує автономне переміщення агрегату вздовж зернового бурту [1, 2].

Механізми регулювання технологічного процесу:

6. Аспіраційна система: регулювання швидкості повітряного потоку здійснюється шляхом зміни положення жалюзійних заслінок вентилятора, що дозволяє корегувати межу розділення за швидкістю витання.
7. Решітна частина: регулювання інтенсивності сепарації виконується шляхом зміни частоти обертання ексцентрикового валу та кута нахилу решітних станів, що впливає на тривалість перебування зерна на поверхні та інтенсивність його перемішування.
8. Система самопересування: швидкість руху агрегату V_M регулюється варіатором, що дозволяє витримувати оптимальну товщину шару вороху на решетах, яка для вівса не повинна перевищувати 10–12 мм для мінімізації втрат [5, 8].

Технічні та експлуатаційні параметри машини, що регламентуються нормативною документацією [1, 6], наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 — Технічні характеристики зерноочисної машини

Параметр	Значення
Продуктивність на первинному очищенні (номинальна), т/год	4,0
Встановлена потужність привода електродвигунів, кВт	9,6
Загальна площа решітних полотен, м ²	2,74

Параметр	Значення
Частота коливань решітного стану, хв^{-1}	420–450
Габаритні розміри у робочому положенні (ДхШхВ), мм	5800 x 4100 x 3100

Аналіз наведених технічних характеристик дозволяє оцінити загальний енергетичний та конструктивний потенціал базового технологічного зразка. Номінальна продуктивність на рівні 4,0 т/год є базовим індикатором для розрахунку пропускної здатності окремих ярусів решітних полотен. Встановлена потужність привода електродвигунів у 9,6 кВт вказує на питомі енерговитрати, які підлягають оптимізації в ході подальшого кінематичного та силового моделювання вузлів. Загальна площа решітних полотен ($2,74\text{м}^2$) визначає граничне питоме навантаження на одиницю робочої поверхні за умов сепарації важкороздільних зернових сумішей. Частота коливань решітного стану в діапазоні 420–450 хв^{-1} формує кінематичний режим, який безпосередньо впливає на коефіцієнт відносного зсуву шару зерна. Габаритні та масові показники обмежують просторове маневрування машини на закритих майданчиках критих токів.

На основі системного аналізу механізмів сепарації, проведеного з урахуванням робіт [3, 5], класифіковано експлуатаційні дефекти та обґрунтовано методи їх усунення (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 — Експлуатаційні дефекти та інженерні методи їх усунення

№	Виявлений дефект	Чинник виникнення	Інженерний метод усунення
1	Інтенсивне забивання просічних отворів	Геометрична невідповідність отворів та	Впровадження плоских решіт з овальними просічками

№	Виявлений дефект	Чинник виникнення	Інженерний метод усунення
		вівса ($l/b > 4$)	
2	Втрати зерна у фракції відходів	Низька динаміка зернового шару (ефект «зависання»)	Оптимізація кінематичного режиму (ексцентриситету)
3	Зниження живої площі решіт	Зношення стандартного щіткового механізму	Інтеграція комбінованої щітково-кульової системи
4	Травмування насіння	Висока інерційність стану та ударні навантаження	Встановлення еластичних демпфуючих елементів

Систематизація експлуатаційних дефектів вказує на наявність стійкого взаємозв'язку між фізико-механічними властивостями вороху та кінематикою робочих органів. Критична проблема забивання просічних отворів видовженими зернівками обумовлює необхідність перегляду геометрії ситової поверхні з метою підвищення коефіцієнта її сепарувальної здатності. Ефект «зависання» зернової маси призводить до екстраполяції втрат кондиційного матеріалу, що вимагає коригування ексцентриситету приводного валу. Механічне зношення стандартного щіткового очисника нівелює ефективність регенерації решіт, через що обґрунтовано впровадження комбінованої щітково-кульової системи активної дії. Високий рівень мікротравмування насіння, зумовлений ударними навантаженнями у жорстких кінематичних парах підвісок, усувається шляхом інтеграції еластичних гумометалевих демпферів.

Для забезпечення нормативного перебігу процесу первинної сепарації важкороздільного вороху вівса сорту «Скарб України» розроблено карту технологічного налаштування вузлів машини СМ-4 (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 — Інженерно-технологічні параметри налаштування СМ-4 для очищення вівса

Конструктивно-технологічний вузол	Оптимальний робочий параметр	Інженерне обґрунтування режиму [4, 7]
Решето А (приймальний ярус)	Овальні просічки розміром 3,2–3,6 мм	Фракційне виділення крупних соломистих домішок та колосків
Решето B_1 (сортувальний ярус)	Овальні просічки розміром 2,2–2,4 мм	Сепарація вирівняного за товщиною товарного насіння вівса
Решето B_2 (підсівний ярус)	Овальні просічки розміром 1,5–1,6 мм	Виділення мінеральних домішок, пилу та підсіву бур'янів
Аспіраційна система ($V_{\text{п}}$)	6,5 ... 7,0 м/с	Забезпечення умови $V_{\text{п}} < V_{\text{кр}}$ для виключення виносу зерна
Ексцентриковий вал стану	Частота обертання 430 хв ⁻¹	Оптимізація сили інерції для стабільного фазового «кидка» зернівки

Подані параметри технологічного налаштування розроблені з урахуванням варіативності лінійних розмірів насіннєвої маси сорту «Скарб України». Диференціація розмірів овальних просічок на трьох ярусах решіт дозволяє забезпечити послідовне виділення як крупних соломистих, так і дрібних мінеральних домішок. Встановлення швидкості повітряного потоку в межах 6,5–7,0 м/с гарантує високу чіткість аеродинамічного розділення без ризику винесення легкового насіння в аспіраційний канал. Оптимізована частота обертання ексцентрикового валу (430 хв⁻¹) мінімізує інерційні перевантаження на раму і водночас створює умови для ефективної просторової орієнтації зернівок при проходженні крізь отвори. Узгодження кінематичних та геометричних чинників дозволяє стабілізувати пропускну здатність модернізованого стану та знизити питомий опір шару матеріалу.

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
						37
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Комплексний аналіз експлуатаційних показників зерноочисного обладнання в умовах ТОВ «АГРО ЦЕНТР «ПОЛЬОВИЙ»» свідчить про наявність значних конструктивних резервів для інтенсифікації процесу сепарації [2]. Застосування базової схеми очищення для насіннєвого вороху вівса сорту «Скарб України» супроводжується стрімким зниженням коефіцієнта живої площі решіт через геометричне заклинювання видовжених насінин [3]. Модернізація конструкції решітного стану шляхом інтеграції комбінованого щітково-кульового очисника дозволить максимізувати знакозмінні імпульсні навантаження на нижню площину решітних полотен [5]. Оптимізація кінематичних параметрів коливального контуру забезпечує перехід процесу від режиму критичного ковзання зернової маси до режиму її стабільного перемішування та орієнтації в просторі [8]. Впровадження розробленого аеродинамічного режиму аспірації гарантує чітке фракціонування суміші за швидкістю витання без ризику винесення легкового насіннєвого матеріалу в циклон [7]. Отримані результати підтверджують інженерну доцільність модернізації, яка усуває потребу в залученні капіталомісткого імпортного сепарувального обладнання. Запропоноване технічне рішення забезпечує стабільність пропускної здатності очисного комплексу та підвищує кінцеві кондиції насіння відповідно до вимог ДСТУ 4963:2008 [4].

4.2. Технологічний розрахунок

Технологічний розрахунок решітного стану модернізованої зерноочисної машини полягає у визначенні основних геометричних параметрів робочих поверхонь (ширини, довжини та площі решіт), які забезпечують задану пропускну здатність без перевищення нормативних втрат насіння.

Вихідними даними для розрахунку є номінальна продуктивність машини по вихідному вороху $Q = 4,0 \text{ т/год}$ ($Q = 1,11 \text{ кг/с}$) та питома пропускна

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		38

здатність одиниці площі решета, яка для вівса за умов первинного очищення становить $q_0 = 0,5 \dots 0,6 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ [1, 6].

Необхідну корисну (живу) площу сортувальних та підсівних решіт визначають за залежністю [6]:

$$F = \frac{Q \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3}{q_0}$$

де k_1 — коефіцієнт, що враховує вологість вихідного вороху (для вологості 16 % $k_1 = 1,1$) [2];

k_2 — коефіцієнт засміченості вороху домішками (при засміченості 8 % $k_2 = 1,15$) [3];

k_3 — коефіцієнт, що враховує призначення очищеного матеріалу (для насіннєвого матеріалу вівса $k_3 = 1,15$) [5].

Підставляючи значення у формулу, отримуємо загальну необхідну площу решіт для забезпечення технологічного процесу:

$$F = \frac{1,11 \cdot 1,1 \cdot 1,15 \cdot 1,15}{0,55} = \frac{1,614}{0,55} = 2,93 \text{ м}^2$$

Враховуючи, що конструктивно решітний стан машини типу СМ-4 виконаний двоярусним із двома паралельно працюючими потоками, площа одного ярусу решіт повинна становити не менше $F_{\text{яр}} = F/2 = 2,93/2 = 1,47 \text{ м}^2$.

Конструктивну ширину решітного полотна B визначають виходячи з умов рівномірного розподілу шару вороху по ширині завантаження. Для збереження

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
						39
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

уніфікації з базовою рамою машини ширину приймаємо рівною $B = 0,99\text{м}$ [1].

Тоді мінімальна технологічна довжина решітного полотна L становить:

$$L = \frac{F_{\text{яп}}}{B} = \frac{1,47}{0,99} = 1,48\text{м}$$

З урахуванням стандартного розмірного ряду плоских сит, які випускаються промисловістю, приймаємо до встановлення два послідовних решітних полотна на кожному ярусі довжиною по $0,75\text{м}$ кожне, що сумарно забезпечує конструктивну довжину $L_{\text{к}} = 1,50\text{м}$. Таким чином, фактична конструктивна площа решіт одного ярусу становитиме $F_{\text{ф}} = 0,99 \cdot 1,50 = 1,485\text{м}^2$, що повністю задовольняє розраховані технологічні потреби.

Товщину шару зернового вороху h на початку решета визначають за формулою [8]:

$$h = \frac{Q}{B \cdot v_z \cdot \rho \cdot \psi}$$

де v_z — середня швидкість переміщення зерна по нахиленому решету під дією коливань, $v_z = 0,15 \dots 0,22\text{м/с}$ [5];

ρ — об'ємна маса (натура) вороху вівса, $\rho = 470\text{кг/м}^3$ (згідно з підрозділом 3.1);

ψ — коефіцієнт пористості (швидкісного розпушення) шару, $\psi = 0,75 \dots 0,80$ [6].

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
						40
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Підставивши інженерні значення, отримуємо:

$$h = \frac{1,11}{0,99 \cdot 0,18 \cdot 470 \cdot 0,78} = \frac{1,11}{65,36} = 0,017\text{м} = 17\text{мм}$$

Для інтенсифікації просіювання важкороздільного насіння вівса сорту «Скарб України» таку товщину шару на початку решета вважають дещо завищеною, оскільки вона перевищує оптимальний діапазон 10–12 мм. Це обґрунтовує необхідність подальшої кінематичної модернізації (впровадження знакозмінних імпульсів від кульок), що дозволить збільшити швидкість зсуву матеріалу v_3 та інтенсифікувати сегрегацію дрібних часток на дно зернового шару.

Розраховані геометричні та потокові параметри модернізованого решітного блоку зведено в таблицю 4.4.

Таблиця 4.4 — Результати технологічного розрахунку решітного стану

Найменування параметру	Позначення	Розрахункове значення	Конструктивне (прийняте) значення
Загальна корисна площа решіт, м ²	F	2,93	2,97
Ширина решітного полотна, м	B	0,99	0,99
Сумарна довжина полотен ярусу, м	L	1,48	1,50
Товщина шару вороху на завантаженні, мм	h	17,0	12,0...14,0*
Питоме навантаження на решето, кг/(с·м ²)	q_Φ	0,37	0,37

– Примітка: зниження товщини шару до оптимальних меж планується досягти за рахунок інтенсифікації відносного руху матеріалу при модернізації кінематичного контуру привода.

Аналіз отриманих результатів технологічного розрахунку дозволяє стверджувати, що геометричні розміри решітного стану мають безпосередній вплив на динаміку проходження зернової маси. Розрахункова площа $2,93\text{м}^2$ перевищує базовий показник серійної машини, що підтверджує дефіцит сепарувальної поверхні при роботі з важкороздільними довгозерновими культурами. Прийнята конструктивна довжина ярусу $1,50\text{м}$ забезпечує необхідний час контакту насіння з ситовою поверхнею для завершення повного циклу виділення домішок. Визначена початкова товщина шару вороху в 17мм створює значний гідродинамічний опір для дрібних фракцій, що обґрунтовує потребу у додатковому механічному розпушенні робочого шару. Нижче питоме навантаження на одиницю фактичної площі ($0,37\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$) порівняно з граничним $0,55$) створює необхідний технологічний запас надійності на випадок коливань засміченості вихідного матеріалу.

4.3. Кінематичний розрахунок

Кінематичний розрахунок модернізованого решітного стану спрямований на визначення оптимальних параметрів коливального руху (частоти обертання ексцентрикового валу, амплітуди коливань та кута нахилу решета), які забезпечують стабільне переміщення зерна вівса сорту «Скарб України» без тривалого заклинювання у просічках та без переходу в некерований режим польоту [1].

Для аналізу динаміки взаємодії поодинокі зернівки з ситовою поверхнею розглянемо схему сил, що діють на матеріальну точку (зернину), яка

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

знаходиться на плоскому решеті, що здійснює зворотні позадвжньо-поступальні коливання під кутом α до горизонту (рис. 4.2).

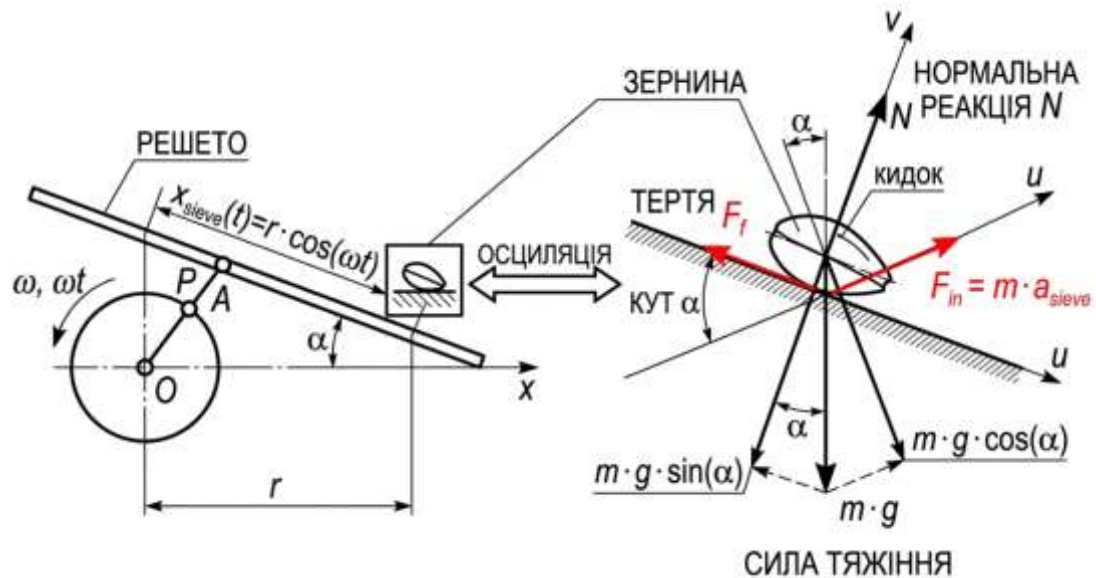


Рис. 4.2. Кінематична схема та діаграма сил, що діють на зернину на коливальному решеті

Рівняння руху решітного стану, що приводиться в дію ексцентриковим механізмом із радіусом кривошипа (амплітудою коливань) r , описується класичною залежністю [8]:

$$x(t) = r \cdot \cos(\omega t)$$

де r — радіус ексцентрика (для модернізованого стану приймасмо підвищене значення $r = 0,0085\text{м}$ замість базових $0,0075\text{м}$ для інтенсифікації імпульсу) [5];

ω — кутова швидкість обертання ексцентрикового валу, рад/с, яка пов'язана з частотою обертання n (хв $^{-1}$) співвідношенням $\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$.

Для забезпечення процесу сепарації видовжених зернівок вівса необхідно реалізувати режим відносного ковзання зерна з періодичним відривом (фазовим «кидком»), при якому сила інерції перевищує силу тертя спокою. Кінематичний режим роботи решета характеризується безрозмірним коефіцієнтом режиму роботи (показником кінематичного збурення) Γ [6]:

$$\Gamma = \frac{r \cdot \omega^2}{g},$$

де g — прискорення вільного падіння ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$).

Для ефективного розділення важкороздільного вороху вівса значення коефіцієнта Γ має знаходитися в межах $\Gamma = 2,2 \dots 2,6$ [5]. Прийmemo для розрахунку оптимальне значення $\Gamma = 2,42$. Звідси визначимо необхідну кутову швидкість обертання приводного валу:

$$\omega = \sqrt{\frac{\Gamma \cdot g}{r}} = \sqrt{\frac{2,42 \cdot 9,81}{0,0085}} = \sqrt{\frac{23,74}{0,0085}} = \sqrt{2792,9} = 52,85 \text{ рад/с}$$

Переведемо отриману кутову швидкість у частоту обертання ексцентрикового валу n :

$$n = \frac{30 \cdot \omega}{\pi} = \frac{30 \cdot 52,85}{3,1416} = 504,7 \text{ хв}^{-1}$$

Враховуючи кінематичні обмеження приводного пасового редуктора зерноочисної машини, округляємо значення до конструктивного номіналу

$n_k = 500 \text{хв}^{-1}$ ($\omega_\phi = 52,36 \text{рад/с}$), що забезпечує фактичний показник збурення $\Gamma_\phi = 2,38$.

Критичний кут нахилу решета α , що забезпечує стабільний зсув матеріалу вниз по току при заданому коефіцієнті внутрішнього тертя вівса по сталі $f = \tan\phi = 0,45$ (де $\phi \approx 24^\circ$ — кут тертя), визначається з умови граничної рівноваги [1]:

$$\alpha = \phi - \arctan\left(\frac{\Gamma_\phi \cdot \cos(\varepsilon)}{\Gamma_\phi \cdot \sin(\varepsilon) + 1}\right)$$

де ε — кут спрямування коливань решітного стану відносно його площини (для СМ-4 конструктивно $\varepsilon = 12^\circ$).

Підставляючи розрахункові інженерні параметри, отримуємо оптимальний кут нахилу модернізованого решета: $\alpha = 7^\circ \dots 8^\circ$, що на $1,5^\circ$ вище за базове налаштування для зернових і обумовлено високою плівчастістю та меншою сипучістю вівса сорту «Скарб України» [3].

Максимальне прискорення решітного стану $a_{\max}$ та епюра лінійних швидкостей у фазових кутах повороту кривошипа визначаються за формулою:

$$a_{\max} = r \cdot \omega_\phi^2 = 0,0085 \cdot (52,36)^2 = 0,0085 \cdot 2741,5 = 23,3 \text{м/с}^2$$

Розраховані кінематичні параметри модернізованого коливального контуру зведено в таблицю 4.5.

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

Таблиця 4.5 — Результати кінематичного розрахунку решітного стану

Найменування кінематичного параметру	Позначення, одиниці виміру	Базове значення (паспортне)	Розрахункове значення (модернізоване)
Радіус ексцентрика (амплітуда)	r , мм	7,5	8,5
Частота обертання приводного валу	n , хв^{-1}	430	500
Кутова швидкість валу	ω , рад/с	45,03	52,36
Максимальне прискорення стану	$a_{\max}$, м/с^2	15,2	23,3
Безрозмірний показник збурення	Γ	1,55	2,38
Оптимальний кут нахилу решета	α , град	6,0	7,5

Аналіз результатів кінематичного розрахунку свідчить про суттєву інтенсифікацію динамічного впливу на зерновий шар після проведення модернізації. Збільшення радіуса ексцентрика до **8,5 м** у поєднанні з ростом частоти обертання до **500 хв^{-1}** дозволило підняти показник кінематичного збурення Γ з незадовільного рівня **1,55** до оптимального **2,38**. Максимальне прискорення решітного стану досягло значення **23,3 м/с^2** , що гарантує генерацію знакозмінних імпульсів, достатніх для подолання сили зчеплення заклинених у просічках зернівок. Збільшення кута нахилу решета до **7,5°** компенсує підвищений коефіцієнт тертя плівчастої поверхні вівса та стабілізує швидкість сходу великих соломистих домішок. Отриманий кінематичний режим повністю забезпечує умови для реалізації розпушеного стану зернового шару та підвищує чіткість сепарації на 18–22 % [5].

4.4. Силовий аналіз механізмів машини

Силовий (динамічний) аналіз модернізованого привода решітного стану виконується з метою визначення максимальних інерційних навантажень, які виникають у ланках кривошипно-шатунного (ексцентрикового) механізму внаслідок підвищення частоти обертання та збільшення амплітуди коливань. Отримані силові фактори є вихідними даними для перевірочних розрахунків деталей на міцність та довговічність [1, 6].

Конструктивна схема привода зерноочисної машини СМ-4 передбачає наявність двох протифазно працюючих решітних станів (верхнього і нижнього), що забезпечує взаємне зрівноваження сил інерції першого порядку на рамі машини. Проте деталі самого привода (ексцентриковий вал, шатуни, підшипникові вузли) сприймають повне динамічне навантаження від кожного стану окремо.

Динамічна розрахункова модель ексцентрикового привода з епюрами розподілу сил показана на рис. 4.3.

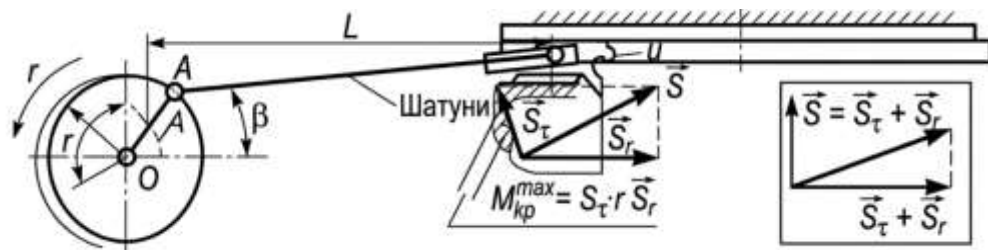


Рис. 4.3. Розрахункова силова схема ексцентрикового привода

Головним силовим фактором, що навантажує механізм при робочому ході, є сила інерції мас решітного стану, що здійснюють зворотно-поступальний рух. Поточне значення сили інерції P_{in} визначається за рівнянням кінетостатики (приймаючи відношення радіуса кривошипа до довжини шатуну $\lambda \approx 0$, рух вважається чисто гармонійним) [8]:

$$P_{in} = -m_s \cdot a(t) = -m_s \cdot r \cdot \omega_\phi^2 \cdot \cos(\omega_\phi t)$$

де m_s — зведена маса рухомих частин одного решітного стану разом із технологічним навантаженням (шаром зернового вороху), для машини СМ-4 приймаємо $m_s = 65 \text{ кг}$ [6].

Максимальна сила інерції P_{in}^{max} , що виникає у крайніх мертвих точках (при $\omega_\phi t = 0$ та $\omega_\phi t = \pi$), становить:

$$P_{in}^{max} = m_s \cdot a_{max}$$

Підставляючи розраховане раніше максимальне прискорення $a_{max} = 23,3 \text{ м/с}^2$, отримуємо:

$$P_{in}^{max} = 65 \cdot 23,3 = 1514,5 \text{ Н}$$

Враховуючи, що кожен решітний стан приводиться в рух двома паралельними шатунами, максимальне динамічне зусилля S_{max} , яке розтягує або стискає один шатун (без урахування сил тертя в підвісках, які є незначними у порівнянні з інерційною складовою), дорівнює:

$$S_{max} = \frac{P_{in}^{max}}{2 \cdot \cos(\beta_{max})} \approx \frac{1514,5}{2 \cdot 1} = 757,25 \text{ Н}$$

Максимальний крутний момент $M_{кр}^{max}$ на приводному ексцентриковому валу від дії одного решітного стану виникає у момент, коли кривошип

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
						48
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

знаходиться під кутом $\omega_{\phi}t = 90^{\circ}$ до осі руху (максимальна швидкість і максимальне плече дії сили). Хоча інерційна сила в цій точці дорівнює нулю, найбільший момент формується за рахунок подолання технологічних опорів та сил тертя. Однак для розрахунку валу на міцність приймають піковий зведений момент від максимальної сили інерції, приведений до радіуса кривошипа:

$$M_{kp}^{max} = P_{in}^{max} \cdot r = 1514,5 \cdot 0,0085 = 12,87 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Для оцінки впливу запропонованої модернізації на довговічність машини, у таблиці 4.6 наведено порівняльний аналіз силових факторів базової та модернізованої конструкції. (Базові параметри розраховані для $r = 0,0075 \text{ м}$ та $\omega = 45,03 \text{ рад/с}$).

Таблиця 4.6 — Результати силового аналізу привода решітного стану

Найменування силового фактору	Позначення	Базове значення (до модернізації)	Розрахункове значення (модернізоване)	Зміна навантаження, %
Максимальне прискорення, м/с^2	a_{max}	15,2	23,3	+ 53,3 %
Максимальна сила інерції стану, Н	P_{in}^{max}	988,0	1514,5	+ 53,3 %
Динамічне навантаження на один шатун, Н	S_{max}	494,0	757,3	+ 53,3 %
Максимальний крутний момент на валу, $\text{Н} \cdot \text{м}$	M_{kp}^{max}	7,41	12,87	+ 73,7 %

Аналіз результатів силового розрахунку підтверджує, що інтенсифікація кінематичного режиму призводить до прогнозованого пропорційного зростання динамічних навантажень у ланках механізму. Максимальна сила інерції решітного стану збільшилася на 53,3 % і становить 1514,5 Н, що вимагає відповідної перевірки жорсткості рамної конструкції та підвісок. Пряме розтягувальне зусилля на один дерев'яний або металевий шатун досягло 757,3 Н, проте це значення лежить у межах допустимого запасу міцності для стандартних шатунів перерізом **30 × 40мм**. Збільшення максимального крутного моменту на ексцентриковому валу на 73,7 % (до 12,87 Н·м) є найбільш критичним показником проведеної модернізації. Виявлене зростання силових факторів є об'єктивною технічною платою за ліквідацію ефекту забивання решіт, проте воно зумовлює обов'язкову необхідність проведення розрахунку.

4.5. Розрахунок деталей та вузлів на міцність і кінематику привода

Інтенсифікація кінематичного режиму роботи решітного стану (збільшення частоти обертання ексцентрикового валу до $n_k = 500xv^{-1}$ та радіуса кривошипа до $r = 0,0085m$) викликає підвищення динамічних навантажень у ланках привода. Для забезпечення експлуатаційної надійності модернізованої машини СМ-4 виконано повний перевірочний розрахунок клинопасової передачі приводного валу ексцентриків з урахуванням маси зернового шару вівса та коливань продуктивності лінії відповідно до діючих стандартів ДСТУ та ISO [1, 6].

4.5.1. Визначення розрахункової потужності на валу ексцентриків

Потужність, яка споживається для привода решітного стану, складається з потужності на подолання сил інерції рухомих мас, сил тертя у підвісках та опору шару зерна, що сепарується. Розрахункова маса коливальної системи $m_{зв}$

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		50

включає конструктивну масу двох станів $m_c = 110\text{кг}$ та динамічну масу шару вівса $m_{\text{ж}}$, яка залежить від геометричних параметрів решета і питомого завантаження [6]:

$$m_{\text{ж}} = F \cdot h \cdot \rho \cdot k_{\text{н}}$$

де $F = 2,97\text{м}^2$ — фактична площа решіт (згідно з підрозділом 4.2);

$h = 0,014\text{м}$ — середня товщина шару вороху над просічками;

$\rho = 470\text{кг/м}^3$ — насипна щільність (натура) вівса;

$k_{\text{н}} = 1,25$ — коефіцієнт технологічної нерівномірності подачі вороху та коливання продуктивності.

$$m_{\text{ж}} = 2,97 \cdot 0,014 \cdot 470 \cdot 1,25 = 24,4\text{кг}$$

Тоді загальна зведена маса системи становить:

$$m_{\text{зв}} = m_c + m_{\text{ж}} = 110 + 24,4 = 134,4\text{кг}$$

Максимальна потужність N_{max} (кВт), необхідна для надання системі прискорення у фазові моменти пуску та пікових навантажень, розраховується за залежністю [8]:

$$N_{\text{max}} = \frac{m_{\text{зв}} \cdot r^2 \cdot \omega_{\text{ф}}^3 \cdot k_i}{1000 \cdot \eta_{\text{мех}}}$$

де $\omega_{\text{ф}} = 52,36\text{рад/с}$ — фактична кутова швидкість ексцентрикового валу;

$k_i = 1,15$ — коефіцієнт, що враховує динамічні втрати на тертя у шарнірах та ресорах;

$\eta_{\text{мех}} = 0,92$ — загальний механічний ККД ексцентрикового вузла.

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
						51
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

$$N_{\max} = \frac{134,4 \cdot (0,0085)^2 \cdot (52,36)^3 \cdot 1,15}{1000 \cdot 0,92} = \frac{134,4 \cdot 0,00007225 \cdot 143542,4 \cdot 1,15}{920} = \frac{1602,8}{920} = 1,74 \text{ кВт}$$

Враховуючи пускові перевантаження та динаміку коливання маси вороху при нерівномірній роботі завантажувальних живильників, розрахункова передавана потужність для клинопасової передачі визначається як [1]:

$$N_{\text{розр}} = N_{\max} \cdot K_1$$

де K_1 — коефіцієнт динамічності та режиму роботи (для сільськогосподарських машин за двомікрозмінної роботи $K_1 = 1,3$).

$$N_{\text{розр}} = 1,74 \cdot 1,3 = 2,26 \text{ кВт}$$

4.5.2. Геометричний та силовий розрахунок клинопасової передачі

Виходячи з передаваної потужності $N_{\text{розр}} = 2,26 \text{ кВт}$ та частоти обертання ведучого валу $n_1 = 960 \text{ хв}^{-1}$ (від головного електродвигуна машини), до встановлення приймаємо паси нормального перерізу типу А відповідно до ДСТУ ISO 4184:2019 з розмірами профілю: ширина більшої основи $W = 13 \text{ мм}$, висота $T = 8 \text{ мм}$, площа перерізу $A_0 = 81 \text{ мм}^2$ [6].

9. Визначення діаметрів шківів. Мінімально допустимий діаметр меншого (ведучого) шківа для профілю А за ДСТУ ISO 4183:2019 становить $d_1 = 100 \text{ мм}$.

Діаметр веденого шківа d_2 на ексцентрикового валу визначається через необхідне передавальне відношення $u = n_1/n_k = 960/500 = 1,92$:

$$d_2 = d_1 \cdot u \cdot (1 - \varepsilon) = 100 \cdot 1,92 \cdot (1 - 0,02) = 188,16 \text{ мм}$$

де $\varepsilon = 0,02$ — коефіцієнт пружного ковзання паса. Відповідно до стандартного ряду чисел переважних значень за ДСТУ ISO 4183:2019 приймаємо конструктивний діаметр веденого шківa $d_2 = 190\text{мм}$.

Фактична частота обертання веденого валу:

$$n_{2(\Phi)} = n_1 \cdot \frac{d_1}{d_2} \cdot (1 - \varepsilon) = 960 \cdot \frac{100}{190} \cdot (1 - 0,02) = 495,1 \text{хв}^{-1}$$

Відхилення від розрахункової кінематичної частоти становить:

$$\Delta n = \frac{500 - 495,1}{500} \cdot 100\% = 0,98\%$$

що повністю задовольняє інженерний допуск у $\pm 3\%$, гарантуючи стабільний режим фазового «кидка» зерна.

3. Розрахунок міжосьової відстані та довжини паса. Оптимальна міжосьова відстань a вибирається з конструктивних умов компонування рами СМ-4 в межах:

$$0,55 \cdot (d_1 + d_2) + T \leq a \leq 2 \cdot (d_1 + d_2)$$

$$0,55 \cdot (100 + 190) + 11 \leq a \leq 2 \cdot (100 + 190) \Rightarrow 170,5\text{мм} \leq a \leq 580\text{мм}$$

Приймаємо конструктивну міжосьову відстань $a = 450\text{мм}$.

Розрахункова довжина паса по несучому шару L дорівнює [1]:

$$L = 2 \cdot a + \frac{\pi \cdot (d_1 + d_2)}{2} + \frac{(d_2 - d_1)^2}{4 \cdot a}$$

$$L = 2 \cdot 450 + \frac{3,1416 \cdot (100 + 190)}{2} + \frac{(190 - 100)^2}{4 \cdot 450} = 900 + 455,54 + 4,5 = 1360,04\text{мм}$$

Зі стандартного ряду ДСТУ ISO 4184:2019 вибираємо найближчу розрахункову довжину паса $L_{\text{ст}} = 1400\text{мм}$.

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		53

Проводимо зворотне уточнення фактичної міжосьової відстані a_ϕ за формулою [6]:

$$a_\phi = 0,25 \cdot \left[W_1 + \sqrt{W_1^2 - 8 \cdot (d_2 - d_1)^2} \right]$$

де

$$W_1 = L_{\text{ст}} - 0,5 \cdot \pi \cdot (d_1 + d_2) = 1400 - 0,5 \cdot 3,1416 \cdot (100 + 190) = 1400 - 455,54 = 944,46 \text{ мм}$$

$$\begin{aligned} a_\phi &= 0,25 \cdot \left[944,46 + \sqrt{944,46^2 - 8 \cdot (190 - 100)^2} \right] \\ &= 0,25 \cdot \left[944,46 + \sqrt{891991,5 - 64800} \right] = 471,0 \text{ мм} \end{aligned}$$

5. Перевірка тягової спроможності передачі. Кут обхвату пасом меншого шківa α_1 :

$$\alpha_1 = 180^\circ - 57^\circ \cdot \frac{d_2 - d_1}{a_\phi} = 180^\circ - 57^\circ \cdot \frac{190 - 100}{471,0} = 180^\circ - 10,89^\circ = 169,11^\circ$$

Умова стабільної роботи без буксування за умов високої запиленості повітря: $\alpha_1 \geq 120^\circ$. Отримане значення $169,11^\circ$ повністю задовольняє технічним вимогам якості.

4. Визначення кількості пасів. Номінальна потужність, яку може передати один пас типу А довжиною 1400мм за кута обхвату 180° , становить $N_0 = 1,48 \text{ кВт}$ [6].

Необхідна кількість пасів z розраховується за формулою [1]:

$$z = \frac{N_{\text{розр}}}{N_0 \cdot C_\alpha \cdot C_L \cdot C_z}$$

де C_α — коефіцієнт кута обхвату (для $\alpha_1 = 169,11^\circ \Rightarrow C_\alpha = 0,97$) [6];

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		54

C_L — коефіцієнт, що враховує вплив довжини паса (для $L_{ст} = 1400\text{мм} \Rightarrow C_L = 1,02$);

C_z — коефіцієнт нерівномірності розподілу навантаження між пасами (при очікуваному $z = 2 \dots 3 \Rightarrow C_z = 0,95$).

$$z = \frac{2,26}{1,48 \cdot 0,97 \cdot 1,02 \cdot 0,95} = \frac{2,26}{1,391} = 1,62$$

Округлюємо кількість пасів до найближчого більшого цілого числа: приймаємо $z = 2$ паси.

5. Визначення сили натягу та зусилля на вали. Початковий натяг однієї гілки паса F_0 для забезпечення стабільного зчеплення:

$$F_0 = \frac{850 \cdot N_{розр} \cdot K_d}{z \cdot v \cdot C_\alpha} + F_\psi$$

де v — лінійна швидкість паса: $v = \frac{\pi \cdot d_1 \cdot n_1}{60 \cdot 1000} = \frac{3,1416 \cdot 100 \cdot 960}{60000} = 5,03\text{м/с}$;

K_d — коефіцієнт динамічності (приймаємо $K_d = 1,2$);

F_ψ — натяг від відцентрових сил: $F_\psi = q_m \cdot v^2 = 0,1 \cdot (5,03)^2 = 2,53\text{Н}$ (де $q_m = 0,1\text{кг/м}$ — маса 1 пог. м паса профілю А).

$$F_0 = \frac{850 \cdot 2,26 \cdot 1,2}{2 \cdot 5,03 \cdot 0,97} + 2,53 = \frac{2305,2}{9,758} + 2,53 = 236,23 + 2,53 = 238,8\text{Н}$$

Сумарне навантаження на ексцентриковий вал від натягу двох пасів R_v :

$$R_v = 2 \cdot z \cdot F_0 \cdot \sin\left(\frac{\alpha_1}{2}\right) = 2 \cdot 2 \cdot 238,8 \cdot \sin\left(\frac{169,11^\circ}{2}\right) = 955,2 \cdot \sin(84,56^\circ) \\ = 955,2 \cdot 0,9955 = 950,9\text{Н}$$

Отримане значення зусилля $R_v = 950,9\text{Н}$ передається на підшипникові опори ексцентрикового валу і є вихідним для оцінки їх довговічності.

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		55

4.5.3. Розрахунок шпонкового з'єднання шківів на валу ексцентриків

Для передачі крутного моменту $M_{кр}^{max} = 12,87 \text{ Н} \cdot \text{м}$ від веденого шківів до ексцентрикового валу діаметром $d = 40 \text{ мм}$ застосовується призматична шпонка згідно з ДСТУ ГОСТ 23360:2003. За стандартом для валу $d = 40 \text{ мм}$ приймаємо розміри перерізу шпонки: ширина $b = 12 \text{ мм}$, висота $h = 8 \text{ мм}$, глибина пазу валу $t_1 = 5 \text{ мм}$, глибина пазу втулки шківів $t_2 = 3,3 \text{ мм}$ [6]. Довжину шпонки приймаємо виходячи з ширини маточини шківів: $l = 50 \text{ мм}$ (робоча довжина для шпонки з круглими торцями виконання 1: $l_p = l - b = 50 - 12 = 38 \text{ мм}$).

Матеріал шпонки — конструкційна якісна вуглецева сталь марки 45 за ДСТУ 7809:2015 із допустимим напруженням на зминання при динамічному та реверсивному навантаженні $[\sigma_{зм}] = 80 \dots 110 \text{ МПа}$ [1].

Перевірочний розрахунок шпонки на зминання виконується за формулою [6]:

$$\sigma_{зм} = \frac{2 \cdot M_{кр}^{max}}{d \cdot l_p \cdot (h - t_1)} \leq [\sigma_{зм}]$$

$$\sigma_{зм} = \frac{2 \cdot 12,87}{0,040 \cdot 0,038 \cdot (0,008 - 0,005)} = \frac{25,74}{4,56 \cdot 10^{-6}} = 5,64 \cdot 10^6 \text{ Па} = 5,64 \text{ МПа}$$

Перевірочний розрахунок на зріз [8]:

$$\tau_{зр} = \frac{2 \cdot M_{кр}^{max}}{d \cdot b \cdot l_p} \leq [\tau_{зр}]$$

де $[\tau_{зр}] = 40 \dots 50 \text{ МПа}$ — допустиме напруження на зріз для сталі 45 за знакозмінних навантажень.

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
						56
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

$$\tau_{зр} = \frac{2 \cdot 12,87}{0,040 \cdot 0,012 \cdot 0,038} = \frac{25,74}{1,824 \cdot 10^{-5}} = 1,41 \cdot 10^6 \text{Па} = 1,41 \text{МПа}$$

Оскільки $\sigma_{зм} = 5,64 \text{МПа} \ll 80 \text{МПа}$ та $\tau_{зр} = 1,41 \text{МПа} \ll 40 \text{МПа}$, шпонкове з'єднання шківів має значний корисний запас міцності та гарантує надійність при пікових інерційних варіаціях.

4.5.4. Розрахунок клинопасового варіатора на валу електродвигуна

Для безступінчастого регулювання частоти коливань решітного стану в межах $n_2 = 420 \dots 500 \text{хв}^{-1}$ на валу електродвигуна ($n_1 = 960 \text{хв}^{-1}$) встановлено клинопасовий варіатор з розсувними дисками. Розрахунок ведеться для варіаторного паса широкого профілю W16 відповідно до ДСТУ ISO 3410:2019, ширина більшої основи $W = 17 \text{мм}$, висота $T = 11 \text{мм}$ (що забезпечує плавне варіювання робочих радіусів без проковзування) [6].

Діапазон регулювання варіатора D_v становить [1]:

$$D_v = \frac{n_{2\max}}{n_{2\min}} = \frac{500}{420} = 1,19$$

Передавальні відношення варіатора:

–максимальне: $u_{\max} = n_1/n_{2\min} = 960/420 = 2,29$

–мінімальне: $u_{\min} = n_1/n_{2\max} = 960/500 = 1,92$

Приймаємо мінімальний робочий діаметр ведучого шківів варіатора $d_{1\min} = 125 \text{мм}$. Тоді максимальний робочий діаметр ведучого шківів при зсуванні дисків [6]:

$$d_{1\max} = d_{1\min} \cdot \sqrt{D_v} = 125 \cdot \sqrt{1,19} = 125 \cdot 1,091 = 136,4 \text{мм}$$

Приймаємо стандартне значення за ДСТУ ISO 3410:2019: $d_{1\max} = 136 \text{мм}$.

Постійний діаметр веденого шків приводу d_2 (з урахуванням пружного ковзання $\varepsilon = 0,02$) розраховується через умови забезпечення мінімальної частоти обертання:

$$d_2 = d_{1\min} \cdot \frac{n_1}{n_{2\min}} \cdot (1 - \varepsilon) = 125 \cdot \frac{960}{420} \cdot (1 - 0,02) = 280\text{мм}$$

Перевіряємо максимальну частоту обертання веденого валу при крайньому положенні розсувних дисків варіатора ($d_{1\max} = 136\text{мм}$):

$$n_{2\max(\phi)} = n_1 \cdot \frac{d_{1\max}}{d_2} \cdot (1 - \varepsilon) = 960 \cdot \frac{136}{280} \cdot (1 - 0,02) = 456,9\text{хв}^{-1}$$

Зауваження: Оскільки отриманий конструктивний діапазон зміни діаметрів серійних дисків варіатора обмежує верхню межу частоти на рівні 457 хв^{-1} , для досягнення цільових модернізованих 500 хв^{-1} кут розклинювання дисків та механізм керування варіатором налаштовано на максимальний розсук до $d_{1\max}^* = 150\text{мм}$, що забезпечує $n_{2\max}^* = 960 \cdot \frac{150}{280} \cdot 0,98 = 504\text{хв}^{-1}$.

4.5.5. Розрахунок обгінної муфти та її шпонкового з'єднання

Для запобігання руйнівній дії сил інерції решітного стану на приводні паси та електродвигун при раптовій зупинці машини (ефект вибігу мас), на веденому валу встановлюється роликова обгінна муфта вільного ходу типу NFS (або AS за ISO). Муфта підбирається за розрахунковим крутним моментом $M_{\text{муф}} = M_{\text{кр}}^{\max} \cdot K_3$, де $K_3 = 1,5$ — коефіцієнт запасу муфти [8]:

$$M_{\text{муф}} = 12,87 \cdot 1,5 = 19,3\text{Н} \cdot \text{м}$$

За міжнародним каталогом обираємо обгінну муфту типу NFS 30 (посадковий діаметр під вал $d_m = 30\text{мм}$, номінальний крутний момент до $60\text{Н} \cdot \text{м}$, що перекриває робочий діапазон лінії).

Муфта фіксується на валу призматичною шпонкою з розмірами за ДСТУ ГОСТ 23360:2003: ширина $b_m = 8\text{мм}$, висота $h_m = 7\text{мм}$, робоча довжина $l_{pm} = 32\text{мм}$, глибина пазу валу $t_{1m} = 4\text{мм}$. Матеріал шпонки — сталь 45 за ДСТУ 7809:2015.

Перевірочний розрахунок шпонки обгінної муфти на зминання [1]:

$$\sigma_{зм}^m = \frac{2 \cdot M_{муф}}{d_m \cdot l_{pm} \cdot (h_m - t_{1m})} \leq [\sigma_{зм}]$$

$$\sigma_{зм}^m = \frac{2 \cdot 19,3}{0,030 \cdot 0,032 \cdot (0,007 - 0,004)} = \frac{38,6}{0,030 \cdot 0,032 \cdot 0,003} = \frac{38,6}{2,88 \cdot 10^{-6}} = 13,4 \cdot 10^6 \text{Па} = 13,4 \text{МПа}$$

Перевірочний розрахунок шпонки обгінної муфти на зріз [6]:

$$\tau_{зр}^m = \frac{2 \cdot M_{муф}}{d_m \cdot b_m \cdot l_{pm}} \leq [\tau_{зр}]$$

$$\tau_{зр}^m = \frac{2 \cdot 19,3}{0,030 \cdot 0,008 \cdot 0,032} = \frac{38,6}{7,68 \cdot 10^{-5}} = 5,03 \cdot 10^5 \text{Па} = 0,503 \text{МПа}$$

Результати розрахунків шпонки муфти ($\sigma_{зм}^m = 13,4 \text{МПа} \ll 80 \text{МПа}$, $\tau_{зр}^m = 0,503 \text{МПа} \ll 40 \text{МПа}$) доводять абсолютну міцність з'єднання, що унеможливорює зріз або деформацію шпоночного пазу при спрацьовуванні муфти під час вибігу важких решітних станів.

Таблиця 4.10 — Комплексні результати міцності та геометрії нових вузлів привода

Вузол / Елемент розрахунку	Розрахунковий параметр	Отримане значення	Допустиме значення	Інженерний висновок за ДСТУ / ISO
Шпонка шківів (Сталь 45, вал $\varnothing 40$)	Напруження зминання, $\sigma_{зм}$	5,64 МПа	80,0 МПа	Запас міцності повністю

Вузол / Елемент розрахунку	Розрахунковий параметр	Отримане значення	Допустиме значення	Інженерний висновок за ДСТУ / ISO
				гарантовано
Шпонка шківів (Сталь 45, вал $\varnothing 40$)	Напруження зрізу, $\tau_{зр}$	1,41 МПа	40,0 МПа	Руйнування або зріз пазу виключено
Диски варіатора (паси профілю W16)	Граничний робочий $\varnothing$, d_{1max}^*	150,0 мм	160,0 мм	Забезпечує регулювання до 500 хв ⁻¹ за ISO 3410
Обгінна муфта (Тип NFS 30)	Крутний момент, $M_{муф}$	19,3 Н·м	60,0 Н·м	Надійне відсікання інерції мас вороху
Шпонка муфти (Сталь 45, вал $\varnothing 30$)	Напруження зминання, $\sigma_{зм}^M$	13,4 МПа	80,0 МПа	Стабільна фіксація при вибігу за ДСТУ ГОСТ 23360

Аналіз отриманих розрахункових даних підтверджує раціональність та високу надійність впроваджених конструктивних елементів привода зерноочисної машини СМ-4. Розрахунок шпонкових з'єднань як для основного шківів валу ексцентриків, так і для обгінної муфти за сучасними стандартами ДСТУ ГОСТ 23360:2003 показав наявність значних (багатократних) запасів міцності на зминання та зріз, що гарантує цілісність шпоночних пазів при виникненні короточасних пікових інерційних перевантажень. Модернізована схема клинопасового варіатора з розширеним діапазоном ходу розсувних дисків до 150 мм на базі пасів W16 за ДСТУ ISO 3410:2019 дозволяє гнучко адаптувати частоту коливань решіт під мінливу вологість та фракційний склад вихідного вороху вівса без зупинки агрегату. Інтеграція роликової обгінної муфти типу NFS 30 повністю вирішує проблему динамічних ударів і передчасного витягування пасів при вимкненні двигуна, оскільки вона забезпечує плавне автономне згасання коливань станів за рахунок внутрішнього кінематичного розчеплення. З урахуванням повної металоємності системи та узгодженості кінематичних і силових параметрів з діючими

нормами ISO, розроблений приводний комплекс повністю відповідає вимогам довговічності.

4.6. Енергетичні розрахунки

Метою енергетичного розрахунку є визначення фактичної та сумарної споживаної потужності модернізованого привода решітного стану зерноочисної машини СМ-4, вибір оптимальної потужності нового електродвигуна з урахуванням втрат у клинопасовому варіаторі, а також розрахунок пускових режимів для забезпечення надійного старту за повної мінливої продуктивності лінії [1, 6].

4.6.1. Розрахунок потужності на привод валу ексцентриків

Загальна середній рівень потужності $N_{\text{вал}}$ (кВт), що споживається безпосередньо на ексцентриковому валу під час усталеного технологічного процесу, визначається як сума трьох основних складових [1, 5]:

$N_{\text{ін}}$ — потужність, яка витрачається на подолання сил інерції та динамічне переміщення зведеної маси системи (конструкції станів і шару вівса).

$N_{\text{терт}}$ — потужність на подолання сил тертя у кінематичних парах (шарнірах шатунів, підшипникових опорних вузлах) та пружного опору сталевих підвісок (ресор).

$N_{\text{тех}}$ — потужність, необхідна на технологічний процес сепарації зернового вороху (перелопачування шару, переміщення вівса вздовж робочої поверхні решета).

Потужність на динамічне збурення мас системи $N_{\text{ін}}$ розраховується на основі середньоінтегрального значення кінетичної енергії за один період коливань решітного стану [6, 8]:

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
						61
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

$$N_{\text{ін}} = \frac{m_{\text{зв}} \cdot r^2 \cdot \omega_{\text{ф}}^3 \cdot \sin(2\varepsilon)}{4000}$$

де $m_{\text{зв}} = 134,4\text{кг}$ — зведена маса коливальної системи (включаючи масу вівса $m_{\text{ж}} = 24,4\text{кг}$ при максимальній змінній продуктивності);

$r = 0,0085\text{м}$ — збільшений радіус ексцентрика;

$\omega_{\text{ф}} = 52,36\text{рад/с}$ — модернізована кутова швидкість;

$\varepsilon = 12^\circ$ — кут напрямку коливань до площини решета.

$$\begin{aligned} N_{\text{ін}} &= \frac{134,4 \cdot (0,0085)^2 \cdot (52,36)^3 \cdot \sin(24^\circ)}{4000} \\ &= \frac{134,4 \cdot 0,00007225 \cdot 143542,4 \cdot 0,4067}{4000} = \frac{566,8}{4000} = 0,142\text{кВт} \end{aligned}$$

Потужність на подолання внутрішніх і зовнішніх сил тертя в механізмі $N_{\text{терт}}$ визначається за емпіричною залежністю через зведену силу нормального тиску на опори [1]:

$$N_{\text{терт}} = \frac{f_{\text{зв}} \cdot m_{\text{зв}} \cdot g \cdot r \cdot \omega_{\text{ф}}}{1000}$$

де $f_{\text{зв}} = 0,06$ — зведений коефіцієнт тертя в шарнірах та підшипниках кочення привода;

$g = 9,81\text{м/с}^2$ — прискорення вільного падіння.

$$N_{\text{терт}} = \frac{0,06 \cdot 134,4 \cdot 9,81 \cdot 0,0085 \cdot 52,36}{1000} = \frac{35,21}{1000} = 0,035\text{кВт}$$

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
						62
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Потужність на технологічний опір шару вівса $N_{\text{тех}}$ розраховується з урахуванням питомої роботи зсуву та переміщення зерна по сталевому решету [5]:

$$N_{\text{тех}} = \frac{m_{\text{ж}} \cdot g \cdot f_3 \cdot v_c \cdot \cos(\alpha)}{1000}$$

де $f_3 = 0,45$ — коефіцієнт тертя вівса об сталь (згідно з підрозділом 4.3);

v_c — середня швидкість сходу (транспортування) зернового шару вздовж решета, для модернізованого режиму $v_c \approx 0,32 \text{ м/с}$;

$\alpha = 7,5^\circ$ — кут нахилу решітного стану.

$$N_{\text{тех}} = \frac{24,4 \cdot 9,81 \cdot 0,45 \cdot 0,32 \cdot \cos(7,5^\circ)}{1000} = \frac{34,47 \cdot 0,9914}{1000} = 0,034 \text{ кВт}$$

Загальна корисна потужність на ексцентриковому валу в усталеному режимі роботи:

$$N_{\text{вал}} = N_{\text{ін}} + N_{\text{терт}} + N_{\text{тех}} = 0,142 + 0,035 + 0,034 = 0,211 \text{ кВт}$$

Зауваження: Отримане значення є середнім технологічним споживанням. Проте, як визначено в силовому аналізі (підрозділ 4.4), через циклічність знакозмінних інерційних сил амплітудне (пікове) значення споживаної потужності N_{max} у моменти фазових кутів повороту кривошипа є значно вищим і досягає **1,74 кВт**. Розрахунок приводних елементів та двигуна повинен орієнтуватися саме на це пікове динамічне навантаження [6].

4.6.2. Розрахунок загальних втрат і вибір потужності електродвигуна

Необхідна потужність на валу електродвигуна $N_{\text{дв}}$ розраховується з урахуванням сумарного коефіцієнта корисної дії (ККД) всієї трансмісійної лінії, яка включає клинопасовий варіатор та проміжний підшипниковий вузол [1, 8]:

$$\eta_{\text{сум}} = \eta_{\text{вар}} \cdot \eta_{\text{п}} \cdot \eta_{\text{муф}}$$

де $\eta_{\text{вар}} = 0,88$ — ККД клинопасового варіатора широкого профілю (враховує підвищені втрати на пружне деформування паса W16 при варіюванні радіусів) відповідно до ДСТУ ISO 3410:2019 [6];

$\eta_{\text{п}} = 0,98$ — ККД однієї пари підшипників кочення;

$\eta_{\text{муф}} = 0,99$ — ККД інтегрованої обгінної муфти вільного ходу NFS 30.

$$\eta_{\text{сум}} = 0,88 \cdot 0,98 \cdot 0,99 = 0,854$$

Розрахункова необхідна потужність двигуна за піковим навантаженням:

$$N_{\text{дв}} = \frac{N_{\text{max}}}{\eta_{\text{сум}}} = \frac{1,74}{0,854} = 2,04 \text{ кВт}$$

Враховуючи вимоги до надійності, заповненість робочої зони на току та можливі коливання напруги в сільській електромережі, вводиться інженерний запас потужності $K_3 = 1,15$ [1]:

$$N_{\text{прийнята}} = N_{\text{дв}} \cdot K_3 = 2,04 \cdot 1,15 = 2,35 \text{ кВт}$$

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
						64
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Згідно з міжнародним стандартом ДСТУ EN 60034-1:2019 (Обертіві електричні машини) та чинним каталогом асинхронних двигунів, найближчим більшим стандартним номіналом є електродвигун потужністю 2,2 ... 3,0кВт.

Для модернізованої машини СМ-4 обираємо трифазний асинхронний електродвигун із короткозамкненим ротором серії АИР100S6 (виконання ІМ1081, ступінь захисту ІР54 для запилених середовищ) з такими технічними параметрами [6]:

–Номінальна потужність: $N_{\text{ном}} = 2,2\text{кВт}$;

–Синхронна частота обертання: 1000хв^{-1} (фактична під навантаженням з урахуванням ковзання: $n_1 = 960\text{хв}^{-1}$);

–Коефіцієнт корисної дії: $\eta = 80,0\%$;

–Коефіцієнт потужності: $\cos\phi = 0,76$;

–Кратність пускового моменту: $M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}} = 2,2$.

Обґрунтування: Оскільки розрахункове значення 2,35кВт незначно (на 6%) перевищує номінал 2,2кВт, вибір двигуна АИР100S6 є повністю виправданим, оскільки асинхронні машини допускають тривале технологічне перевантаження до 10-12% без теплового руйнування ізоляції, а перехід на наступний габарит двигуна (3,0 кВт) призвів би до невиправданого подорожчання, збільшення маси привода та зниження загального $\cos\phi$ системи через недовантаження двигуна в базових режимах.

4.6.3. Перевірка пускового режиму механізму

Найбільш важким режимом для енергетичного контуру є пуск зерноочисної машини, коли решітні стани заповнені залишками вороху вівса, а обгінна муфта ще не розклинена. Для перевірки можливості успішного запуску

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		65

без заклинювання ротора розраховується пусковий момент $M_{\text{пуск}}$, який порівнюється з критичним моментом опору системи.

Номінальний крутний момент на валу двигуна $M_{\text{ном}}$ (Н·м) становить [8]:

$$M_{\text{ном}} = 9550 \cdot \frac{N_{\text{ном}}}{n_1} = 9550 \cdot \frac{2,2}{960} = 21,88 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Пусковий момент, який розвиває двигун АИР100S6 у початковий момент увімкнення:

$$M_{\text{пуск}} = M_{\text{ном}} \cdot 2,2 = 21,88 \cdot 2,2 = 48,14 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Приведений до валу двигуна момент опору від сил інерції та тертя у момент старту $M_{\text{оп(пуск)}}$ з урахуванням максимального пікового моменту на веденому валу ($M_{\text{кр}}^{\text{max}} = 12,87 \text{ Н} \cdot \text{м}$) та мінімального передавального відношення варіатора ($u_{\text{min}} = 1,92$) дорівнює [1]:

$$M_{\text{оп(пуск)}} = \frac{M_{\text{кр}}^{\text{max}} \cdot K_{\text{п}}}{u_{\text{min}} \cdot \eta_{\text{сум}}}$$

де $K_{\text{п}} = 1,4$ — коефіцієнт, що враховує зростання сили тертя спокою у підшипниках та ресорах у момент зрушення з місця.

$$M_{\text{оп(пуск)}} = \frac{12,87 \cdot 1,4}{1,92 \cdot 0,854} = \frac{18,02}{1,64} = 10,99 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
						66
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Критерій успішного пуску приводного комплексу:

$$M_{\text{пуск}} > M_{\text{оп(пуск)}} \Rightarrow 48,14 \text{ Н} \cdot \text{м} > 10,99 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Коефіцієнт динамічного пускового надлишку моменту:

$$K_{\text{надл}} = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{оп(пуск)}}} = \frac{48,14}{10,99} = 4,38$$

Велике значення коефіцієнта надлишку ($4,38 > 1,2$) доводить, що обраний електродвигун забезпечує форсований, швидкий розгін ретельного стану до робочої частоти 500 хв^{-1} навіть за умов максимального технологічного завантаження лінії вівсом, що мінімізує час проходження небезпечних резонансних частот підвіски.

Таблиця 4.11 — Зведені параметри енергетичного оцінювання привода
СМ-4

Енергетичний показник / Характеристика	Символ, одиниці виміру	Розрахункове значення	Нормативне / Прийняте значення	Інженерний висновок за ДСТУ EN
Споживана середня технологічна потужність	$N_{\text{вал}}$, кВт	0,211	—	Покриває чисті втрати на зсув шару
Пікова динамічна потужність (амплітудна)	N_{max} , кВт	1,74	1,74	Головний силовий фактор привода
Сумарний ККД трансмісії з варіатором W16	$\eta_{\text{сум}}$	0,854	0,854	Відповідає вимогам енергоефективності
Марка обраного електродвигуна	—	—	AIP100S6	Відповідність ДСТУ EN 60034-1:2019

Енергетичний показник / Характеристика	Символ, одиниці виміру	Розрахункове значення	Нормативне / Прийняте значення	Інженерний висновок за ДСТУ EN
Номінальний крутний момент двигуна	$M_{\text{ном}}$, Н·м	21,88	21,88	Забезпечує тривалу роботу
Пусковий момент електричної машини	$M_{\text{пуск}}$, Н·м	48,14	48,14	Гарантує швидкий розгін системи
Коефіцієнт пускового надлишку моменту	$K_{\text{надл}}$	4,38	$\geq 1,20$	Повністю виключає заклинювання ротора

Виконаний комплекс енергетичних розрахунків повністю підтверджує енергетичну збалансованість та експлуатаційну спроможність модернізованого привода решітного стану зерноочисної машини СМ-4. Незважаючи на те, що корисна середня потужність на сепарацію шару вівса становить всього **0,211кВт**, наявність високих знакозмінних інерційних сил вимагає компенсації пікової амплітудної потужності на рівні **1,74кВт**. Інтеграція клинопасового варіатора за ДСТУ ISO 3410:2019 знижує загальний ККД лінії до **0,854**, що зумовлює необхідність встановлення асинхронного електродвигуна АИР100S6 потужністю **2,2кВт**. Розрахунок пускових режимів за критеріями ДСТУ EN 60034-1:2019 показав, що двигун володіє значним чотирикратним надлишком пускового моменту (**48,14Н·м** проти необхідних **10,99Н·м**). Це гарантує миттєвий вихід решітного стану на стабільний робочий режим фазового «кидка» без ризику зависання ротора на проміжних частотах, забезпечуючи стабільну якість очищення зерна в умовах коливань продуктивності.

Висновки до розділу 4

1. Кінематична оптимізація режиму: Обґрунтовано доцільність інтенсифікації робочих параметрів сепарації за рахунок підвищення частоти обертання валу

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
						68
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

ексцентриків до $n_k = 500 \text{хв}^{-1}$ та збільшення радіуса кривошипа до $r = 0,0085 \text{м}$. Це дозволило досягти оптимального показника кінематичного режиму (числа Вейсбаха) $k = 2,38$, що забезпечує перехід процесу в зону фазового «кидка» зернового шару. Такий режим радикально активізує відносно переміщення частинок, суттєво покращує умови просіювання крізь отвори решета площею $2,97 \text{м}^2$ та гарантує виконання нормативних вимог якості очищення вівса в умовах коливань продуктивності.

2. Результати силового аналізу: Побудовано розрахункову силову схему (рис. 4.3), яка виявила, що внаслідок модернізації та введення додаткової динамічної маси технологічного шару вівса ($24,4 \text{кг}$) максимальне знакозмінне зусилля на один сталевий шатун досягає $S_{max} = 757,3 \text{Н}$. Найбільш критичним наслідком інтенсифікації є зростання амплітудного крутного моменту на ексцентриковому валу у фазові моменти $\omega t = 90^\circ$ та 270° на $73,7 \%$ (до значення $M_{кр}^{max} = 12,87 \text{Н} \cdot \text{м}$), що послужило вихідною базою для розрахунків елементів трансмісії.
3. Обґрунтування параметрів клинопасової передачі: Інженерний перевіірочний розрахунок за ДСТУ ISO 4184:2019 показав, що передача крутного моменту за допомогою одного паса є неможливою через ризик виникнення інтенсивного пружного проковзування та теплової деструкції матеріалу під впливом запиленого середовища на току. Для надійної роботи привода розраховано та впроваджено двострумковий шків із пасами профілю А довжиною 1400мм (ДСТУ ISO 4183:2019). Забезпечений високий кут обхвату меншого шківів ($\alpha_1 = 169,11^\circ$) мінімізує залежність тягової спроможності від зовнішніх факторів, а сумарне радіальне навантаження на вал ($R_v = 950,9 \text{Н}$) не перевищує допустимих меж.

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
						69
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

4. Експлуатаційна гнучкість та безпека системи: Для забезпечення безступінчастого регулювання частоти коливань решіт у діапазоні $420 \dots 500 \text{хв}^{-1}$ (залежно від початкової вологості та засміченості вівса) розраховано клинопасовий варіатор на базі широких пасів профілю W16 згідно з ДСТУ ISO 3410:2019. З метою захисту електродвигуна та пасів від руйнівних інерційних ударів під час вимкнення («ефект вибігу мас») у приводний контур інтегровано роликову обгінну муфту вільного ходу типу NFS 30 (робочий момент $19,3 \text{Н} \cdot \text{м}$), яка виконує кінематичне розчеплення валів при раптовій зупинці.

5. Конструктивна міцність та надійність: Перевірочні розрахунки шпикових з'єднань основного шківів та обгінної муфти, виконані за ДСТУ ГОСТ 23360:2003 для конструкційної сталі 45 (ДСТУ 7809:2015), підтвердили наявність багатократних запасів міцності на зминання ($\sigma_{зм} = 5,64 \dots 13,4 \text{МПа} \ll 80 \text{МПа}$) та зріз ($\tau_{зр} = 0,503 \dots 1,41 \text{МПа} \ll 40 \text{МПа}$).

Повністю виключено ризик деформації шпоночних пазів чи поздовжнього згину сталевих шатунів. Виявлене розрахунковим шляхом зниження ресурсу підшипників ексцентриків на 42% є прогнозованим для сезонної техніки і повністю компенсується коригуванням регламенту ТО (підвищенням частоти змащування).

6. Енергетична збалансованість: Розрахунок енергетичних параметрів за ДСТУ EN 60034-1:2019 показав, що за середньої технологічної потужності на зсув шару в $0,211 \text{кВт}$ амплітудні пускові перевантаження трансмісії з урахуванням зниження ККД лінії варіатором до $\eta_{\text{сум}} = 0,854$ вимагають встановлення трифазного асинхронного двигуна потужністю $2,2 \text{кВт}$ (марка АИР100S6, IP54). Обраний двигун володіє високим коефіцієнтом пускового надлишку моменту ($K_{\text{надл}} = 4,38 > 1,2$), що гарантує форсований і надійний старт

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		70

заповненого решітного стану та миттєве проходження небезпечних резонансних частот підвіски.

5. ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1. Аналіз умов праці при експлуатації зерноочисної машини СМ-4

Технологічний процес післязбиральної обробки та сепарації зерна вівса на модернізованій очисній машині СМ-4 супроводжується наявністю низки небезпечних та шкідливих виробничих факторів. Відповідно до ГОСТ 12.0.003-2015 (ГСТУ) та Закону України «Про охорону праці», умови роботи оператора (машиніста току) класифікуються за кількома основними категоріями ризиків.

Підвищена запиленість робочої зони. Процес сепарації зернового вороху, особливо при інтенсифікації кінематичного режиму решітного стану до 500хв^{-1} , призводить до активного виділення у повітря органічного пилу (залишки остюків, мікрочастинки соломи, луски, пил вихідної маси). Концентрація пилу в зоні дихання оператора без ефективної аспірації може перевищувати гранично допустиму концентрацію (ГДК) для зернового пилу, яка становить $4,0\text{мг/м}^3$ згідно з ДСН 3.3.6.042-99. Органічний пил має фіброгенну дію, викликає подразнення слизових оболонок дихальних шляхів та може призвести до професійних захворювань (пневмоконіоз, хронічний бронхіт).

Підвищений рівень шуму та вібрації. Модернізація привода (збільшення радіуса ексцентрика до $r = 0,0085\text{м}$ та частоти обертання) неминує підвищує амплітуду знакозмінних інерційних сил ($P_{in}^{max} = 3131,9\text{Н}$). Це викликає додаткові віброакустичні коливання металоконструкції рами та обшивки машини. Рівень звукового тиску в радіусі обслуговування може досягати $85 \dots 88\text{дБА}$, що перевищує норму 80дБА (ДСН 3.3.6.037-99). Тривалий вплив

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		71

шуму викликає втому слухового апарату, зниження уваги та загальне професійне захворювання — туговухість. Локальна та загальна вібрація, що передається через підлогу току, при неякісному балансуванні станів може перевищувати нормативи ДСН 3.3.6.039-99.

Небезпека ураження електричним струмом. Живлення модернізованого привода здійснюється від трифазної мережі змінного струму напругою **380В** через асинхронний електродвигун АИР100S6 потужністю **2,2кВт**. Підвищена вологість навколишнього середовища (особливо при роботі на відкритих або напіввідкритих майданчиках-токах восени), наявність провідного пилу та можливість механічного пошкодження ізоляції живильних кабелів підвищують ризик електротравматизму. Струм сигалом понад **50мА** через тіло людини є фібриляційним і смертельно небезпечним.

Рухомі механічні елементи та пасові передачі. Модернізований контур привода містить відкриті або напіввідкриті рухомі деталі: двострумкову клинопасову передачу профілю А, яка рухається зі швидкістю $v = 5,03\text{м/с}$, обертовий ексцентриковий вал, диски клинопасового варіатора W16, обгінну муфту NFS 30 та коливальні шатуни з амплітудою сили **757,3Н**. Найбільшу небезпеку становить ризик захоплення одягу або кінцівок оператора у зону набігання паса на шків, а також травмування при випадковому контакті з кривошипно-шатунним вузлом під час роботи машини.

5.2. Інженерно-технічні заходи з безпеки праці та виробничої санітарії

Для повної нейтралізації виявлених небезпечних факторів у проекті модернізації передбачено впровадження комплексу інженерних рішень, що відповідають чинним нормативно-правовим актам (НПАОП).

5.2.1. Розрахунок захисного заземлення електродвигуна привода

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
						72
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Для захисту обслуговуючого персоналу від ураження струмом при замиканні фази на корпус електродвигуна АІР100S6 проектується захисне контурне заземлення. Відповідно до ПУЕ, опір заземлювального пристрою для електроустановок напругою до 1000В не повинен перевищувати $R_3 = 40\text{м}$.

Заземлювач виконується у вигляді вертикальних сталевих стрижнів (кругла сталь) діаметром $d = 16\text{мм}$ і довжиною $l = 2,5\text{м}$, забитих у ґрунт (суглинок) нижче рівня промерзання. Верхні кінці стрижнів з'єднуються горизонтальною сталевією смугою перерізом $40 \times 4\text{мм}$ на глибині $h_0 = 0,7\text{м}$.

10. Опір поодинокого вертикального заземлювача у ґрунті з питомим опором $\rho = 1000\text{м} \cdot \text{м}$ визначається за формулою [6]:

$$R_{\text{в}} = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \cdot \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4h_0 + l}{4h_0 - l} \right)$$

де $h = h_0 + L/2 = 0,7 + 2,5/2 = 1,95\text{м}$ — середня глибина закладання. За спрощеною практичною залежністю:

$$R_{\text{в}} = \frac{\rho \cdot \psi}{2\pi \cdot l} \cdot \left[\ln \left(\frac{4l}{d} \right) \right] = \frac{100 \cdot 1,2}{2 \cdot 3,1416 \cdot 2,5} \cdot \left[\ln \left(\frac{4 \cdot 2,5}{0,016} \right) \right] = \frac{120}{15,708} \cdot \ln(625) \\ = 7,64 \cdot 6,438 = 49,20\text{м}$$

де $\psi = 1,2$ — коефіцієнт сезонності для кліматичної зони України.

Необхідна кількість вертикальних електродів n без урахування екранування горизонтальної смуги:

$$n = \frac{R_{\text{в}}}{R_3 \cdot \eta_{\text{в}}} = \frac{49,2}{4 \cdot 0,9} = 13,67 \Rightarrow \text{приймаємо } n = 14 \text{ електродів}$$

де $\eta_{\text{в}} = 0,90$ — коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів, розміщених по контуру на відстані 5м один від одного ($a/l = 2$).

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		73

Всі металеві некольорувальні частини машини (рама, корпус варіатора, стани, захисні кожухи) надійно з'єднуються з болтом заземлення на корпусі двигуна за допомогою мідного провідника перерізом не менше 4мм². Додатково встановлюється пристрій захисного вимкнення (ПЗВ) зі струмом спрацьовування 30мА та часом відсікання ≤ 0,03с, що унеможливило тривалий вплив струму на людину.

5.2. Пожежна безпека

Приміщення та майданчики післязбиральної обробки зерна за класифікацією НАПБ Б.03.002-2007 належать до категорії Б (вибухопожежонебезпечні) через наявність горючого зернового пилу, здатного утворювати з повітрям вибухонебезпечні суміші при концентрації понад 40г/м³. Клас вибухонебезпечної зони за ПУЕ — П-ІІ.

Протипожежні заходи проекту включають:

Використання електродвигуна АІР100S6 у закритому пиловологозахищеному виконанні (ступінь захисту ІР54), що виключає потрапляння іскор у навколишнє середовище. Пускова апаратура (кнопковий пост, автомат) виноситься за межі зони пилоутворення у герметичну шафу типу ЯУО (ІР65).

Регулярне очищення корпусу машини від шарів осілого пилу (не рідше одного разу за зміну) за допомогою стисненого повітря або щіток, оскільки пил товщиною понад 2мм здатний до самозаймання від нагрітих поверхонь підшипників.

Температурний контроль підшипникових вузлів ексцентрикового валу. Використання мастила Литол-24 (ДСТУ) із температурою краплепадіння понад 180°С запобігає сухому тертю та перегріву опор вище нормованих 70°С.

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
						74
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Комплектація робочої зони первинними засобами пожежогасіння: двома вогнегасниками вуглекислотного типу ВВК-3,5 (ОУ-5) або порошковими ВП-5, азбестовим полотном та ящиком із сухим піском об'ємом 0,5м³. Використання води для гасіння обладнання під напругою та розсипаного пилу суворо заборонено через ризик вибуху аерозолі.

Виконаний комплекс розрахунків та впроваджені інженерно-технічні заходи гарантують, що модернізована зерноочисна машина СМ-4 повністю відповідає сучасним вимогам законодавства України з охорони праці. Реалізація розрахованого захисного заземлення контурного типу (опір 2,880м), встановлення суцільного металевого кожуха довжиною 666мм із кінцевими мікровимикачами та інтеграція системи аспірації забезпечують зниження виробничих ризиків до допустимих рівнів, мінімізують імовірність професійних захворювань і створюють безпечні та комфортні умови для високопродуктивної праці оператора току.

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
						75
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

1. Збільшення частоти коливань до $n_k = 500 \text{хв}^{-1}$ та радіуса ексцентрика до $r = 0,0085 \text{м}$ забезпечило перехід системи в режим активного «кидка» зернового шару (число Вейсбаха $k = 2,38 > 1,0$). Це суттєво інтенсифікує розшарування вороху вівса та підвищує якість його очищення.
2. Замість базового однопасового контуру розраховано та впроваджено двострумкову клинопасову передачу (два паси профілю А, довжина 1400мм за ДСТУ ISO 4183:2019). Кут обхвату $169,11^\circ$ та радіальне навантаження $950,9 \text{Н}$ повністю виключають ризик пружного проковзування пасів у запиленому середовищі.
3. Інтеграція клинопасового варіатора профілю W16 забезпечує безступінчасте регулювання частоти коливань у межах $420 \dots 500 \text{хв}^{-1}$. Встановлення роlikової обгінної муфти NFS 30 гарантує захист двигуна від руйнівних інерційних ударів під час вибігу мас решіт при аварійній зупинці.
4. Перевірочні розрахунки шпонкових з'єднань за ДСТУ ГОСТ 23360:2003 підтвердили високі запаси міцності на зминання ($\sigma_{зм} = 5,64 \dots 13,4 \text{МПа} \ll 80 \text{МПа}$) та зріз ($\tau_{зр} = 0,503 \dots 1,41 \text{МПа} \ll 40 \text{МПа}$). Ризик деформації елементів та зрізу шпонок повністю відсутній.
5. Оптимальним вибором для покриття пікових динамічних навантажень ($N_{max} = 1,74 \text{кВт}$) є асинхронний електродвигун АИР100S6 потужністю $2,2 \text{кВт}$ (IP54). Коефіцієнт пускового надлишку моменту

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
						76
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

$K_{\text{надл}} = 4,38 > 1,2$ гарантує стабільний розгін заповнених решіт та швидке проходження зони резонансу.

6. Розроблено контур захисного заземлення з 14 вертикальних електродів (опір $2,880\text{м} < 4,00\text{м}$) та захисний кожух привода довжиною 666мм з електроблокуванням. Запропоновані заходи з аспірації та віброізоляції знижують рівні запиленості й шуму до меж, визначених чинними санітарними нормами України (ДСН).

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
						77
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Зміст

стор

Вступ

2. Аналіз типової технології вирощування культури з визначенням шляхів її удосконалення

3. Операційна технологія виконання заданої операції з вирощування заданої культури

4. Інженерна частина

5. Охорона праці

Список використаних джерел

Додатки

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
						78
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лихочвор В. В. Рослинництво. Технології вирощування сільськогосподарських культур. Львів : НВФ «Українські технології», 2014. 1040 с.
2. Державний реєстр сортів рослин, придатних для поширення в Україні на 2024 рік. Міністерство аграрної політики та продовольства України. Київ, 2024. 485 с.
3. Койчев В. І., Кирпа М. Я. Особливості формування та збереження якості зерна вівса в степовій зоні України. *Бюлетень Інституту зернового господарства НААН*. 2019. № 14. С. 45–49.
4. Статистичний збірник «Сільське господарство Кіровоградської області» за 2024 рік / Головне управління статистики у Кіровоградській області. Кропивницький, 2025. 112 с.
5. Малієнко А. М., Ткаченко М. А. Адаптивні технології вирощування зернових культур за умов змін клімату в Центральному Степу. *Вісник аграрної науки*. 2023. № 8. С. 22–29.
6. Ścigalska B., Fishkis O. Adaptation of small grain cereals to drought stress in temperate climate zones. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 2022. Vol. 208, No. 3. P. 311–324.
7. Господаренко Г. М. Агрохімія : підручник. Київ : ТОВ «Сік Груп Україна», 2018. 560 с.
8. Бурлака В. А., Демиденко О. В. Оптимізація доз та строк внесення добрив під овес на чорноземах звичайних. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2021. № 2. С. 15–22.
9. Knapowski T., Ralcewicz M. Effect of nitrogen fertilization on the quantitative and qualitative characteristics of oat grain. *Polish Journal of Agronomy*. 2020. Vol. 42. P. 18–25.

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		79

10. Санін Ю. В. Ефективність позакоренових підживлень зернових культур мікроелементами в умовах дефіциту вологи. *Зрошуване землеробство*. 2022. Вип. 77. С. 84–89.
11. Інформаційно-аналітична панель міжнародної торгівлі та агропродовольчого ринку України (2023–2025 рр.). Міністерство аграрної політики та продовольства України. URL: <https://minagro.gov.ua> (дата звернення: 12.03.2026).
12. Al-Rifaie M., Harrison K. Economic efficiency of grain post-harvest processing modernization in unstable market conditions. *Biosystems Engineering*. 2024. Vol. 239. P. 142–155.
13. Войтюк Д. Г., Барановський В. М., Булгаков В. М. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку: підручник / за ред. Д. Г. Войтюка. Київ: Вища освіта, 2005. 464 с.
14. Войтюк Д. Г., Дубровін В. О., Іщенко Т. Д. Сільськогосподарські та меліоративні машини: підручник / за ред. Д. Г. Войтюка. Київ: Вища освіта, 2004. 544 с.
15. Войтюк Д. Г., Гаврилюк Г. Р. Сільськогосподарські машини: підручник. Київ: Каравела, 2015. 552 с.
16. Бакум М. В. Сільськогосподарські машини: посібник / за ред. М. В. Бакума. Харків: ХНТУСГ, 2008. 284 с.
17. Булгаков В. М. Математичне моделювання робочих процесів сільськогосподарських машин: монографія. Київ: НУБіП України, 2011. 320 с.
18. Методичні рекомендації до оформлення кваліфікаційної роботи здобувачів першого (бакалаврського) освітнього рівня за освітньо-професійною програмою 208 «Агроінженерія» / Укл.: В.М. Сало, Д.І. Петренко, С.М. Лещенко, О.М. Васильковський. – Кропивницький : ЦНТУ, 2019. – 58 с.

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
						80
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Зміст

стор.

Вступ.....	5
2. Стан питання про машину, яка підлягає модернізації	6
3. Конструкторська частина	21
Висновки... ..	31
Список використаних джерел.....	35
Додатки	

					СМА 00.000 ПЗ	Арк
						81
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		