МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Скок Михайло Сергійович

УДК 631.3:633.31:631.35

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Удосконалення комплексу машин для вирощування люцерни з модернізацією ворушилки ВРМ-Ф-7,5

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр
кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело _____ Скок М.С.

Керівник роботи
Білецький В.Р.
кандидат технічних наук, доцент

Житомир – 2026

АНОТАЦІЯ

Скок Михайло Сергійович. Удосконалення комплексу машин для вирощування люцерни з модернізацією ворушилки ВРМ-Ф-7,5. – *Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавр за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2026.

У кваліфікаційній роботі розглянуто питання удосконалення комплексу машин для вирощування люцерни на сіно з модернізацією ворушилки ВРМ-Ф-7,5. У першому розділі проаналізовано існуючі технології вирощування люцерни в Україні та світі, динаміку зміни посівних площ, а також сучасний стан виробництва багаторічних і однорічних трав для потреб тваринництва. Встановлено, що ефективність заготівлі сіна значною мірою залежить від правильного вибору технології, своєчасного виконання польових операцій, рівня механізації, автоматизації та використання цифрових засобів контролю стану посівів. У другому розділі спроєктовано технологію вирощування люцерни на сіно для умов зони Полісся з урахуванням ґрунтово-кліматичних особливостей, агротехнічних вимог культури та потреб раціонального використання машинно-тракторного парку. До технологічної карти включено сучасні операції з підготовки ґрунту, сівби, догляду за посівами, моніторингу полів за допомогою БПЛА зі штучним інтелектом, скошування, ворушіння, згрібання, пресування та транспортування сіна. У третьому розділі виконано конструктивний аналіз ворушилки ВРМ-Ф-7,5, визначено основні недоліки її роботи та обґрунтовано напрям модернізації робочих органів. Запропонована модернізація передбачає встановлення шарнірного вузла на граблинах, що дає змогу зменшити контакт пружинних зубів із нерівностями ґрунту, знизити вібраційні навантаження та підвищити надійність машини. Результати роботи спрямовані на підвищення продуктивності технологічного процесу заготівлі сіна люцерни, зменшення втрат кормової маси, покращення якості сіна та підвищення ефективності використання комплексу машин.

Ключові слова: кукурудза, передпосівний обробіток, роторний агрегат, операційна технологія.

ANNOTATION

Mykhailo Serhiiovych Skok. Improvements to the alfalfa cultivation machinery system, including the modernisation of the VRM-F-7.5 tiller. – *Qualification work on the rights of the manuscript*.

Qualification work for obtaining a bachelor's degree in the specialty 208 – Agricultural Engineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2026.

This thesis examines ways of improving the machinery used for growing alfalfa for hay, including the modernisation of the VRM-F-7.5 tedder. The first chapter analyses existing alfalfa cultivation technologies in Ukraine and worldwide, trends in changes to sown areas, and the current state of production of perennial and annual grasses for livestock farming. It has been established that the efficiency of hay harvesting depends to a large extent on the correct choice of technology, the timely execution of field operations, the level of mechanisation and automation, and the use of digital tools for monitoring crop conditions. In the second chapter, a technology for growing alfalfa for hay has been designed for the conditions of the Polissia region, taking into account soil and climatic characteristics, the agronomic requirements of the crop, and the need for the rational use of the machinery and tractor fleet. The production plan includes modern operations for soil preparation, sowing, crop management, field monitoring using AI-equipped UAVs, mowing, tedding, raking, baling and hay transport. The third chapter presents a structural analysis of the VRM-F-7.5 tedders, identifies the main shortcomings in their operation and justifies the direction of modernisation for the working parts. The proposed modernisation involves fitting a hinged assembly to the rakes, which reduces contact between the spring tines and uneven ground, lowers vibration loads and improves the machine’s reliability. The results of this work are aimed at increasing the productivity of the alfalfa hay harvesting process, reducing forage losses, improving hay quality and enhancing the efficiency of the machinery complex.

Keywords: maize, pre-sowing tillage, rotary unit, operational technology.

ЗМІСТ

ВСТУП……..……5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОЩУВАННЯ ЛЮЦЕРНИ……...9
РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОЩУВАННЯ ЛЮЦЕРНИ НА СІНО В УМОВАХ ЗОНИ ПОЛІССЯ……17
РОЗДІЛ 3. КОНСТРУКТИВНА ЧАСТИНА……...31
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ……..…….……41
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ…….……..…..43

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Сучасне сільськогосподарське виробництво потребує постійного удосконалення технологій вирощування кормових культур, оскільки якісна кормова база є однією з головних умов ефективного розвитку галузі тваринництва. Особливе місце серед багаторічних кормових культур займає люцерна, яка характеризується високою врожайністю зеленої маси, значним вмістом протеїну, доброю кормовою цінністю та позитивним впливом на родючість ґрунту. Завдяки здатності накопичувати біологічний азот, поліпшувати структуру ґрунту та забезпечувати декілька укосів за сезон, люцерна є важливою культурою для формування стабільної кормової бази молочного і м’ясного тваринництва.

В умовах зони Полісся вирощування люцерни на сіно має значні перспективи, проте потребує врахування ґрунтово-кліматичних особливостей регіону. Для цієї зони характерні дерново-підзолисті ґрунти, підвищена кислотність, нерівномірне забезпечення вологою та потреба у проведенні вапнування і збалансованого удобрення. Тому ефективність вирощування люцерни значною мірою залежить від правильно підібраної технології, якісної підготовки ґрунту, своєчасної сівби, догляду за посівами, моніторингу їхнього стану та раціональної організації заготівлі сіна.

Одним із найвідповідальніших етапів у технології виробництва сіна люцерни є виконання операцій після скошування: ворушіння, перевертання, згрібання, підбирання, пресування та транспортування. Саме на цих операціях виникають значні втрати листкової маси, погіршення якості корму, збільшення тривалості сушіння та підвищення витрат енергії. Особливо важливе значення має робота ворушилки, яка забезпечує рівномірне розпушування скошеної маси, прискорює випаровування вологи та створює умови для одержання якісного сіна.

Ворушилка ВРМ-Ф-7,5 належить до машин, які широко застосовуються для ворушіння і розкидання трав’яної маси під час заготівлі

сіна. Проте в процесі експлуатації її робочі органи зазнають значних динамічних і вібраційних навантажень, особливо під час роботи на нерівній поверхні поля. Контакт пружинних зубів із ґрунтом призводить до їхнього прискореного зношування, появи втомних тріщин, поломок та зниження надійності машини. Це зумовлює необхідність модернізації конструкції ворушилки з метою підвищення довговічності її робочих органів, зменшення простоїв і покращення якості технологічного процесу.

Актуальність теми кваліфікаційної роботи полягає в необхідності підвищення ефективності комплексу машин для вирощування люцерни на сіно шляхом удосконалення технологічного процесу та модернізації ворушилки ВРМ-Ф-7,5. Використання сучасних машин, цифрового моніторингу посівів, БПЛА зі штучним інтелектом, а також конструктивне покращення робочих органів ворушилки дають змогу підвищити продуктивність заготівлі сіна, зменшити втрати кормової маси та поліпшити якість готового корму.

Метою кваліфікаційної роботи є удосконалення комплексу машин для вирощування люцерни на сіно в умовах зони Полісся з модернізацією ворушилки ВРМ-Ф-7,5 для підвищення надійності її роботи та якості виконання технологічного процесу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання:** проаналізувати сучасний стан і технології вирощування люцерни в Україні та світі; розглянути значення багаторічних і однорічних трав у формуванні кормової бази тваринництва; оцінити рівень механізації, автоматизації та роботизації процесів вирощування і заготівлі люцерни на сіно; спроєктувати технологію вирощування люцерни для умов зони Полісся; розробити технологічну карту вирощування люцерни на сіно з урахуванням використання сучасної техніки та БПЛА-моніторингу; обґрунтувати графік завантаження машинно-тракторного парку; виконати аналіз конструкції ворушилки ВРМ-Ф-7,5 та визначити основні недоліки її роботи;

запропонувати конструктивне удосконалення робочих органів ворушилки і провести необхідні розрахунки елементів модернізованої конструкції.

Об'єктом дослідження є технологічний процес вирощування і заготівлі люцерни на сіно в умовах зони Полісся.

Предметом дослідження є комплекс машин для вирощування люцерни та конструктивно-технологічні параметри модернізованої ворушилки ВРМ-Ф-7,5.

Методи дослідження ґрунтуються на аналізі існуючих технологій вирощування кормових культур, порівнянні сучасних засобів механізації, розрахунку продуктивності машинно-тракторних агрегатів, побудові технологічної карти, графіка завантаження техніки, а також на інженерних розрахунках елементів конструкції ворушилки.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. . Білецький В.Р., **Скок М.С.** Обґрунтування доцільності вирощування люцерни для виробництва сінажу в кормовій системі господарства. Збірник тез XII Міжнародної науково-практичної конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь». 29 квітня 2026 року. Житомир. Видавничий центр ЖАТФК. 2026. С. 91-95.

2. Білецький В.Р., Шмагун М.О., Островський О.Ю., Крижанівський М.С., **Скок М.С.** Перспективні способи внесення мінеральних добрив. VI Міжнародна науково-практична конференція молодих учених «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі». Запоріжжя: ТДАТУ. URL: https://www.tsatu.edu.ua/tstt/wp-content/uploads/sites/6/bileckyj_26-2.pdf (дата звернення 07.06.2026).

Практичне значення роботи полягає у розробленні раціональної технології вирощування люцерни на сіно з використанням сучасного комплексу машин, цифрового моніторингу стану посівів та модернізованої ворушилки ВРМ-Ф-7,5. Запропоновані рішення можуть бути використані в

аграрних підприємствах зони Полісся для підвищення продуктивності польових робіт, зниження експлуатаційних витрат, зменшення втрат сіна та підвищення надійності роботи машин під час заготівлі кормів.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновку та списку використаних джерел з 30 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 46 сторінок комп'ютерного тексту, містить 12 рисунків, 11 таблиць та 3 додатки

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОЩУВАННЯ ЛЮЦЕРНИ

1.1. Значення люцерни у сучасному кормовиробництві

Люцерна посівна є однією з основних багаторічних бобових культур кормового призначення. Її використовують для одержання сіна, сінажу, зеленого корму, трав'яного борошна, гранул і білково-вітамінної сировини. Цінність культури визначається поєднанням високого вмісту протеїну, доброї поїдання тваринами, здатності швидко відростати після укосу та позитивного впливу на родючість ґрунту. Завдяки симбіозу з бульбочковими бактеріями люцерна накопичує біологічний азот і може зменшувати потребу наступних культур у мінеральних азотних добривах.

Для галузі тваринництва люцернове сіно має особливе значення, оскільки є джерелом перетравного протеїну, каротину, кальцію та структурної клітковини. За довідковими даними Feedipedia, середній вміст сирого протеїну в сіні люцерни становить близько 18 % у сухій речовині, а сама культура належить до найважливіших бобових кормів світу. Тому розширення виробництва якісного сіна люцерни безпосередньо впливає на собівартість молока, м'яса та на стабільність кормової бази господарства.

У технологічному аспекті люцерна є культурою з високими вимогами до своєчасності польових операцій. Особливо важливими є якісна підготовка дрібногрудочкуватого посівного ложа, рівномірне загортання насіння на невелику глибину, контроль бур'янів у перший рік життя, своєчасне скошування у фазі бутонізації – початку цвітіння та швидке висушування рослинної маси. Саме на етапі заготівлі сіна значну роль відіграють машини для ворушіння, зокрема ворушилка ВРМ-Ф-7,5, яка забезпечує розпушування прокосів, прискорення сушіння та зменшення ризику втрат поживних речовин.

1.2. Динаміка площ під люцерною в Україні та світі

Люцерна поширена у більшості країн помірного кліматичного поясу. За міжнародними довідковими джерелами, вона вирощується більш ніж у 80 країнах, а світові площі оцінюються приблизно у 30–35 млн га. Найбільші площі традиційно зосереджені у США, Канаді, Аргентині, країнах Європейського Союзу, Китаї та окремих країнах Центральної Азії. Світова площа загалом залишається великою, однак її структура змінюється під впливом розвитку молочного скотарства, вартості зрошення, конкуренції з кукурудзяним силосом і переходу частини господарств на інтенсивні технології заготівлі сінажу.

В Україні динаміка є менш стабільною. У 1990-х роках площі під люцерною були значними, однак у подальшому відбулося їх скорочення через зменшення поголів'я великої рогатої худоби, зміну структури посівів на користь експортно орієнтованих культур, зменшення частки кормових сівозмін і погіршення матеріально-технічної бази частини тваринницьких господарств. За опублікованими оцінками, площі люцерни в Україні зменшилися приблизно з 1,8–1,9 млн га у 1990-х роках до близько 0,7 млн га у сучасний період. При цьому офіційна статистика Держстату частіше подає дані не окремо щодо люцерни, а в складі групи багаторічних трав, що потребує обережного порівняння різних джерел.

Таблиця 1.1 – Орієнтовна динаміка площ під люцерною в Україні та світі

Період	Україна, млн га	Світ, млн га	Коментар
1990-ті	1.850	35.0	оцінка для посівів люцерни в Україні
2013	0.608	35.0	498 тис. га на сіно + 110 тис. га на зелений корм
2018	0.920	30.0	оцінка за опублікованими матеріалами
2020-ті	0.700	30.0	орієнтовна сучасна оцінка

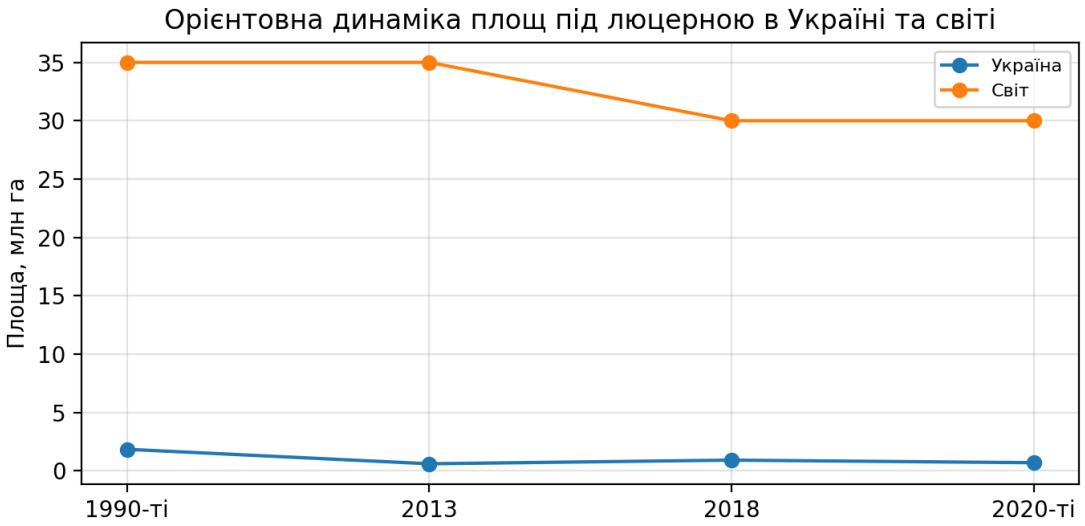


Рис. 1.1. Орієнтовна зміна площ під люцерною в Україні та світі.

1.3. Стан галузі вирощування багаторічних та однорічних трав на корм

Кормові трави є базою для стабільного розвитку скотарства, вівчарства та конярства. Багаторічні трави забезпечують тривалий продуктивний період, захищають ґрунт від ерозії, поліпшують його структуру та дозволяють одержувати кілька укосів за сезон. Однорічні трави, навпаки, дають змогу швидко формувати зелений конвеєр, компенсувати нестачу кормів у певні періоди року та гнучко реагувати на потреби ферми. Найбільшу цінність для молочного скотарства мають багаторічні бобові трави, насамперед люцерна, конюшина та їх сумішки зі злаковими компонентами.

За відкритими даними Держстату, площа кормових культур в Україні за 2015–2024 рр. скоротилася з 1990 до 1231 тис. га, тобто приблизно на 38 %. Площі багаторічних трав за цей період зменшилися з 1027 до 677 тис. га, а площі однорічних трав – з 393 до 172 тис. га. Така динаміка свідчить про звуження кормової бази, що особливо відчутно для господарств, які орієнтуються на власне виробництво грубих і соковитих кормів.

Таблиця 1.2 – Посівні площі кормових культур в Україні, тис. га

Рік	Кормові культури, всього	Багаторічні трави	Однорічні трави
2015	1990	1027	393
2016	1932	995	374
2017	1858	955	353
2018	1769	920	338
2019	1725	921	312
2020	1677	869	302
2021	1535	819	269
2022	1322	724	195
2023	1272	698	184
2024	1231	677	172

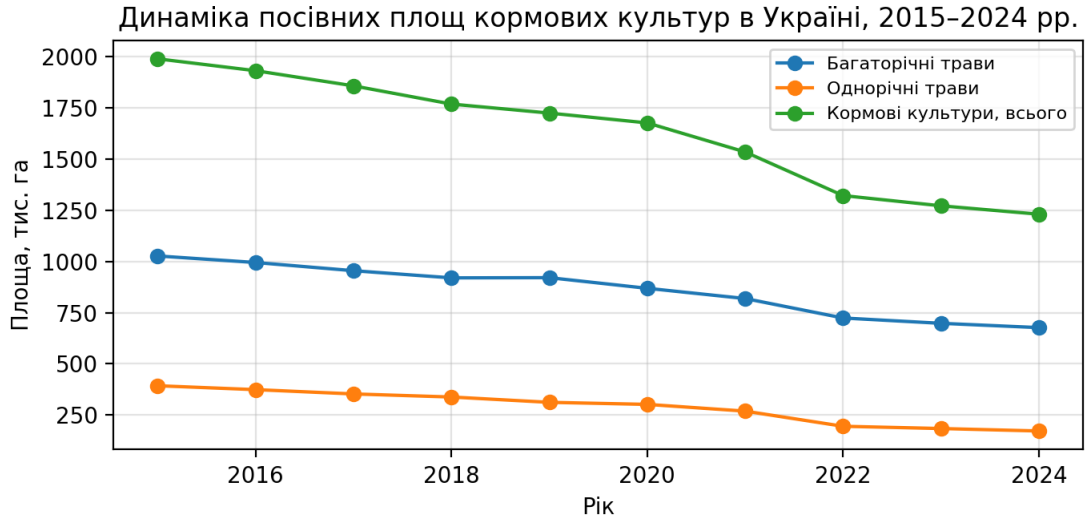


Рис. 1.2. Динаміка площ кормових культур, багаторічних та однорічних трав в Україні

У структурі кормових культур 2024 року найбільшу частку займали багаторічні трави. Це підтверджує їх стратегічну роль у виробництві сіна і сінажу. Разом із тим скорочення площ під травами означає, що для збереження обсягів виробництва кормів господарства мають підвищувати урожайність, зменшувати втрати під час заготівлі та покращувати якість машинного виконання операцій.



Рис. 1.3. Структура площ кормових культур в Україні у 2024 році.

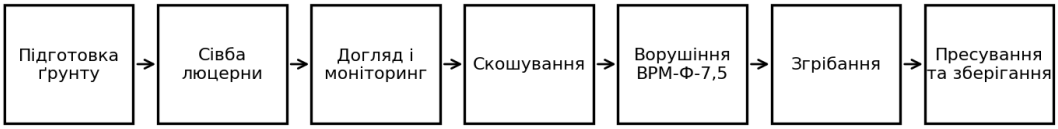
1.4. Аналіз технологій вирощування люцерни на сіно

Типова технологія вирощування люцерни на сіно включає підбір попередника, основний і передпосівний обробіток ґрунту, внесення фосфорно-калійних добрив, сівбу, догляд за посівами, скошування, плющення або кондиціювання маси, ворушіння, згрібання у валки, пресування, транспортування і зберігання. Найкращими попередниками є озимі зернові, кукурудза на силос, зернобобові та просапні культури, після яких поле залишається чистим від багаторічних бур’янів. Сівбу доцільно виконувати рядковим способом із дрібним загортанням насіння, оскільки насіння люцерни дрібне і потребує доброго контакту з вологим ґрунтом.

Перший рік вирощування є найвідповідальнішим: рослини повільніше конкурують із бур’янами, а надмірне загущення або глибока сівба можуть знижувати польову схожість. У наступні роки головним завданням стає правильний режим скошування. Запізнення із збиранням підвищує врожайність маси, але зменшує вміст протеїну і збільшує частку стебел. Надто ранні та часті укоси послаблюють кореневу систему і скорочують довговічність травостою.

Під час заготівлі сіна головним технологічним ризиком є втрата листя, у якому концентрується значна частина білка і каротину. Тому операції

ворушіння та згрібання мають виконуватися тоді, коли маса достатньо підв’ялена, але не пересушена. Ворушилка ВРМ-Ф-7,5 застосовується для розкидання валків і прискорення висихання рослинної маси. Проблемним місцем таких машин є контакт пружинних пальців з нерівностями ґрунту, що викликає вібрації, прискорене втомне руйнування зубів і збільшення експлуатаційних витрат. Отже, модернізація ворушилки спрямована не лише на підвищення надійності машини, а й на збереження якості корму.



Технологічний ланцюг заготівлі сіна люцерни

Рис. 1.4. Узагальнена схема технологічного процесу заготівлі сіна люцерни.

1.5. Рівень механізації, автоматизації і роботизації процесу вирощування люцерни

Сучасна технологія вирощування люцерни характеризується високим рівнем механізації основних польових операцій. У великих господарствах використовують енергонасичені трактори, комбіновані ґрунтообробні агрегати, пневматичні сівалки точного або рядкового висіву, дискові косарки-плющилки, роторні ворушилки, валкоутворювачі, рулонні й великопакувальні прес-підбирачі, навантажувачі та причепи для транспортування тюків. Найменш механізованими залишаються контроль якості сіна, оперативне прийняття рішень щодо строків ворушіння і згрібання, а також моніторинг вологості маси безпосередньо в полі.

Автоматизація проявляється у використанні GPS-навігації, систем паралельного водіння, ISOBUS-керування, датчиків вологості й щільності тюків, карт урожайності, електронного обліку виконаних робіт і

дистанційного моніторингу машин. Провідні виробники техніки для кормозаготівлі вже пропонують рішення для автоматичного налаштування пресів, контролю щільності тюків, керування тракторно-знаряддєвими агрегатами та передачі польових даних у цифрові платформи господарства. Це зменшує залежність результату від кваліфікації оператора й підвищує повторюваність технологічних параметрів.

Роботизація вирощування люцерни поки що перебуває на етапі поступового впровадження. Практичне значення вже мають автономні трактори для ґрунтообробних і транспортних операцій, дрони для обстеження травостою, оцінювання забур'яненості та стану відростання після укосу, а також роботизовані платформи для точкового внесення засобів захисту. Для заготівлі сіна перспективними є системи автоматичного розпізнавання валків, автономного руху агрегатів у полі, датчики втрат листя і системи прогнозування оптимального часу пресування за даними вологості, температури й погодного прогнозу.

Таблиця 1.3 – Рівні технічного розвитку технології вирощування люцерни на сіно

Рівень	Типові засоби	Операції	Очікуваний ефект
Механізація	Трактори, сівалки, косарки, ворушилки, валкоутворювачі, прес-підбирачі	Усі основні польові операції	Зростання продуктивності, зменшення ручної праці
Автоматизація	GPS, автопілот, ISOBUS, датчики вологості, електронний облік	Водіння, налаштування агрегатів, контроль якості тюків	Підвищення точності, економія пального, стабільність якості
Роботизація	Автономні трактори, дрони, роботизовані платформи, машинний зір	Моніторинг, точкове внесення, автономний рух, контроль валків	Зменшення потреби в операторах, робота у вузькі погодні вікна

Висновки по розділу

Проведений аналіз показує, що люцерна залишається однією з ключових культур для формування білкової кормової бази тваринництва. У світі вона вирощується на десятках мільйонів гектарів, а в Україні зберігає важливе

місце у структурі багаторічних трав. Водночас скорочення площ кормових культур і зменшення поголів’я ВРХ підвищують вимоги до продуктивності кожного гектара, якості сіна та ефективності машинно-тракторного комплексу.

Найбільші резерви підвищення ефективності полягають у своєчасному виконанні технологічних операцій, прискореному сушінні рослинної маси, зменшенні втрат листя та підвищенні надійності робочих органів кормозаготівельних машин. Для цього доцільно використовувати сучасні косарки-плющилки, роторні ворушилки, валкоутворювачі, прес-підбирачі з датчиками вологості, GPS-навігацію та елементи цифрового моніторингу. Модернізація ворушилки ВРМ-Ф-7,5 є обґрунтованою, оскільки саме якість ворушіння впливає на швидкість висушування люцерни, рівномірність формування маси і технічну довговічність робочих органів.

РОЗДІЛ 2
ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОЩУВАННЯ ЛЮЦЕРНИ НА СІНО В УМОВАХ ЗОНИ ПОЛІССЯ

Люцерна є однією з найцінніших багаторічних бобових кормових культур, тому проектування технології її вирощування має враховувати не лише агрономічні вимоги культури, а й можливості сучасного машинно-тракторного парку. У зоні Полісся основними обмежувальними факторами є підвищена кислотність дерново-підзолистих ґрунтів, нерівномірність зволоження, ризик перезволоження на понижених ділянках, а також короткі строки заготівлі сіна між опадами. Для кваліфікаційної роботи прийнято розрахункову площу люцерни на сіно 100 га, безпокривний спосіб сівби, використання травостою протягом 3-4 років та одержання трьох укосів у продуктивний рік.

Проектована технологія поєднує класичні механізовані операції з елементами точного землеробства: агрохімічним обстеженням, картографуванням полів, використанням БПЛА з мультиспектральною камерою та програмами штучного інтелекту для оцінки густоти посіву, виявлення зон стресу, бур’янів і нерівномірного відростання після укосів. У технологічному процесі особлива увага приділяється операціям скошування, ворушіння, згрібання і пресування, оскільки саме на етапі заготівлі сіна виникають найбільші втрати листкової маси та поживних речовин.

2.1. Природно-виробничі умови Полісся та вимоги люцерни до технології вирощування

Поліська зона характеризується достатнім або надлишковим зволоженням, відносно прохолодною весною, частими опадами влітку і переважанням дерново-підзолистих ґрунтів. Для люцерни такі умови є прийнятними лише за умови правильного вибору поля, регулювання кислотності та дотримання вимог до дренованості. Культура формує потужну кореневу систему, але погано переносить застій води, ущільнення орного

шару і кислу реакцію ґрунтового розчину. Тому у проектованій технології передбачено обов’язковий аналіз ґрунту, вапнування за потреби, внесення фосфорно-калійних добрив і створення дрібногрудочкуватого ущільненого посівного ложа.

Таблиця 2.1 – Вихідні умови для проектування технології вирощування люцерни на сіно

Показник	Прийняте значення	Вплив на технологію	Проектне рішення
Зона вирощування	Полісся	Достатнє зволоження, ризик перезволоження	Вибір добре дренованих полів, недопущення ущільнення
Тип ґрунту	дерново-підзолистий, супіщаний або легкосуглинковий	низька буферність, нестача Ca, Mg, P і K	вапнування, фосфорно-калійне удобрення
Оптимальна реакція ґрунту	pH 6,3-7,0	кислі ґрунти пригнічують бульбочкові бактерії	аналіз ґрунту і внесення $CaCO3$
Спосіб сівби	безпокривний рядковий	менша конкуренція за світло і вологу	сівалка з точним дозуванням дрібного насіння
Норма висіву	16-18 кг/га	формування щільного травостою	інокуляція насіння і контроль глибини 1,5-2,0 см
Запланована кількість укосів	3 укоси за сезон	потреба у швидкому висушуванні маси	косарка-плющилка, ворушилка ВРМ-Ф-7,5, граблі, прес-підбирач
Цільова вологість сіна при пресуванні	15-18%	ризик пліснявіння або втрати листя	контроль вологоміром і мінімізація зайвих проходів

Отже, технологія для умов Полісся повинна бути адаптивною. Якщо поле має pH нижче 5,5, люцерну доцільно висівати лише після розкислення ґрунту, оскільки без вапнування різко знижується активність бульбочкових бактерій і погіршується засвоєння фосфору. На полях із ризиком перезволоження пріоритет надається вирівнюванню поверхні, підтриманню водовідведення та уникненню ранніх заїздів важкої техніки після дощу. Для збереження структури ґрунту перевагу мають агрегати з широкими шинами, оптимальним тиском у шинах і мінімальною кількістю проходів.

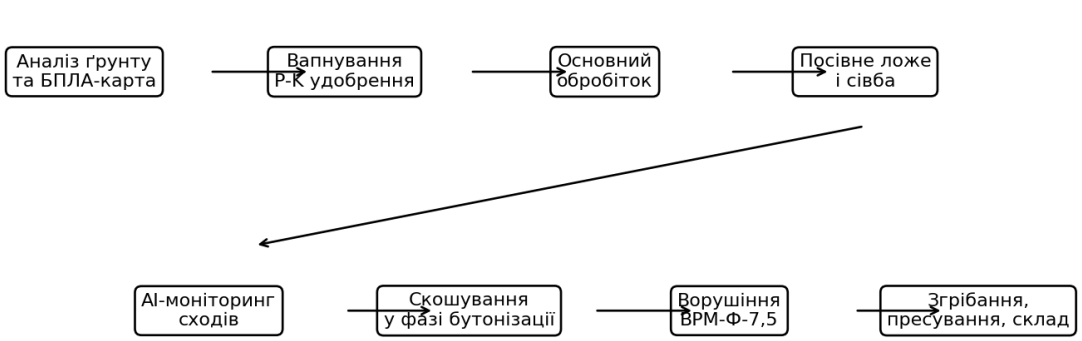


Рис. 2.1. Схема проектованої технології вирощування люцерни на сіно

2.2. Обґрунтування проектованого комплексу машин

Комплекс машин сформовано так, щоб забезпечити якісну підготовку ґрунту, рівномірну сівбу дрібного насіння, оперативну заготівлю сіна у короткі погодні вікна та цифровий контроль стану посівів. Як енергетичні засоби прийнято універсальні трактори середнього тягового класу John Deere 6R 145 і John Deere 6R 185. Трактор John Deere 6R 185 доцільно використовувати на енергоємних роботах - оранці, сівбі комбінованою сівалкою і пресуванні; трактор меншої потужності використовується на внесенні добрив, коткуванні, ворушінні, згрібанні та транспортних роботах.

Для сівби прийнято сівалку Väderstad Rapid A 600S із робочою шириною 6 м та міжряддям 12,5 см, що дозволяє точно розміщувати насіння в ущільненому посівному ложі. Для заготівлі сіна запроектовано косарку-плющилку CLAAS DISCO 3200 C CONTOUR, модернізовану ворушилку ВРМ-Ф-7,5, роторні граблі CLAAS LINER 2900 та прес-підбирач KRONE Comprima F 155 XC. Центральним об’єктом удосконалення у кваліфікаційній роботі є ворушилка ВРМ-Ф-7,5, яка працює після скошування і повинна забезпечувати швидке та рівномірне підсушування люцерни без надмірного обламування листків.

Таблиця 2.2 – Склад проектованого машинно-тракторного комплексу

Група робіт	Машина/агрегат	Робоча ширина	Орієнтовна продуктивність	Основне призначення	Особливість використання
Енергетичний засіб	John Deere 6R 185	-	-	енергоємні польові роботи	потужність для сівби, оранки та пресування
Енергетичний засіб	John Deere 6R 145	-	-	легші та середні операції	менші витрати пального на доглядових роботах
Обробіток ґрунту	Väderstad Carrier 525	5,25 м	4,5-5,0 га/год	лущення стерні	інтенсивне перемішування рослинних решток
Основний обробіток	Lemken Juwel 8	2,4-2,8 м	1,4-1,7 га/год	оранка	якісне загортання добрив і вапна
Передпосівний обробіток	Farmet Kompaktomat K600PS	6 м	5,0-6,0 га/год	вирівнювання і підготовка ложа	один комбінований прохід
Сівба	Väderstad Rapid A 600S	6 м	5,0-5,5 га/год	рядкова сівба люцерни	контроль глибини і норми висіву
Моніторинг	DJI Mavic 3M + AI-аналітика	до 100 га за виліт/день	70-100 га/год у розрахунку	NDVI/NDRE, густота, стрес	цифрова карта завдань для агронома
Скошування	CLAAS DISCO 3200 C CONTOUR	3 м	2,5-2,8 га/год	скошування з плющенням	прискорення підсушування стебел
Ворушіння	модернізована ВРМ-Ф-7,5	7-7,5 м	6,0-6,3 га/год	розпушення і перевертання маси	зменшення втрат листкової частини
Згрібання	CLAAS LINER 2900	8-9 м	6,8-7,0 га/год	формування валків	рівномірне завантаження преса
Пресування	KRONE Comprima F 155 XC	підбирач 2,15 м	2,8-3,0 га/год	пресування в рулони	контроль щільності та вологості

У технологічній карті продуктивність агрегатів прийнята за умов середньої довжини гону, коефіцієнта використання часу зміни 0,75 та тривалості зміни 8 год. Фактичні показники можуть коригуватися залежно

від рельєфу, вологості ґрунту, конфігурації полів, стану травостою та погодних умов у період сінозаготівлі.

2.3. Роль БПЛА зі штучним інтелектом у проектованій технології

Моніторинг полів БПЛА включено до технологічної карти як обов'язкову операцію. Для цього передбачено мультиспектральний дрон DJI Mavic 3M або аналогічний аграрний БПЛА, який формує RGB-зображення та карти вегетаційних індексів. Штучний інтелект у програмному забезпеченні використовується не для заміни агронома, а як інструмент швидкого відбору підозрілих ділянок: зон зрідження, перезволоження, бур'янів, пошкодження шкідниками, нерівномірного відростання після укосу або нестачі живлення.

Практична цінність такого моніторингу полягає в тому, що польові огляди стають адресними. Агроном отримує карту проблемних зон, після чого приймає рішення про ремонт посіву, локальне підживлення, зміну строку скошування або коригування роботи ворушилки. Для люцерни на сіно особливо важливо вчасно визначати готовність до укосу, оскільки запізнення зі скошуванням знижує вміст протеїну та підвищує частку грубих стебел, а надто раннє скошування послаблює травостій.

2.4. Технологічна карта вирощування люцерни на сіно

Технологічну карту розроблено для площі 100 га. Вона охоплює роботи попереднього осіннього періоду, весняне закладання посіву, цифровий моніторинг і заготівлю трьох укосів сіна. Розрахункова потреба в машинному часі визначена діленням обсягу робіт на годинну продуктивність агрегату. Потреба у змінах обчислена за формулою: кількість змін = машинний час / (8 × 0,75). Витрати пального визначено за питомою нормою на гектар або на операцію.

Таблиця 2.3 – Етапи цифрового моніторингу люцерни за допомогою БПЛА

Етап	Строк виконання	Дані, що збираються	AI-обробка	Виробниче рішення
Перед закладанням посіву	серпень-вересень	ортофото, рельєф, неоднорідність рослинних решток	виділення контурів і зон ризику	план відбору ґрунтових проб і вапнування
Після сходів	травень	густота, пропуски, бур’яни, колір рослин	класифікація зон зрідження	ремонтні рішення та адресний огляд
Перед укосом	за 3-5 діб до скошування	NDVI/NDRE, висота, вирівняність травостою	прогноз біомаси і неоднорідності	черговість скошування ділянок
Після укосу	через 7-10 діб	швидкість відростання, сліди ущільнення, перезволоження	виявлення проблемних смуг	коригування руху техніки і підживлення
Восени	вересень-жовтень	густота травостою, плями випадання	оцінка перезимівлі	план догляду на наступний рік

Таблиця 2.4 – Технологічна карта вирощування люцерни на сіно на площі 100 га

№	Операція	Строк	Обсяг	Агрегат	W, га/год	Змін	Пальне, л	Примітка
1	Агрохімічне обстеження, контурне картування і первинний обліт поля БПЛА зі штучним інтелектом	серпень-вересень попереднього року	100.0 га	оператор БПЛА + DJI Mavic 3M + AI-аналітика NDVI/NDRE	80.0	0.2	5	формування цифрової карти поля
2	Лущення стерні після попередника	серпень-вересень	100.0 га	John Deere 6R 185 + Väderstad Carrier 525, дискова борона	4.8	3.5	750	закриття вологи, провокація падалиці
3	Внесення вапнякових матеріалів за результатами аналізу ґрунту	вересень-жовтень	100.0 га	John Deere 6R 145 + Bogballe L2W / Amazone ZA-TS	12.0	1.4	200	2,0-3,0 т/га CaCO3 за потреби
4	Внесення фосфорно-калійних добрив під основний обробіток	вересень-жовтень	100.0 га	John Deere 6R 145 + Amazone ZA-TS / Rauch Axis	15.0	1.1	180	P60K90 з уточненням за аналізом ґрунту
5	Оранка або глибоке розпушування під люцерну	жовтень	100.0 га	John Deere 6R 185 + Lemken Juwel 8, 5 корпусів	1.6	10.4	1700	глибина 25-27 см
6	Ранньовесняне закриття вологи	березень-квітень	100.0 га	John Deere 6R 145 + Борона шлейфова 12 м	8.5	2.0	300	вирівнювання поверхні
7	Передпосівна культивація з вирівнюванням посівного ложа	квітень	100.0 га	John Deere 6R 185 + Farmet Kompaktomat K600PS	5.5	3.0	500	глибина 3-4 см
8	Передпосівне коткування	квітень	100.0 га	John Deere 6R 145 + Котки Cambridge 6 м	6.5	2.6	300	ущільнення насіннєвого ложа
9	Підготовка насіння: скарифікація, інокуляція бульбочковими бактеріями, протруєння біопрепаратом	квітень	1.8 т	стаціонарно + протруювач/змішувач насіння	0.6	0.5	0	18 кг/га кондиційного насіння
10	Сівба люцерни безпокривним способом	квітень-початок травня	100.0 га	John Deere 6R 185 + Väderstad Rapid A 600S з дрібнонасіннєвим обладнанням	5.4	3.1	650	рядки 12,5 см, глибина 1,5-2,0 см
11	Післяпосівне коткування	квітень-початок травня	100.0 га	John Deere 6R 145 + Котки Cambridge 6 м	6.5	2.6	300	поліпшення контакту насіння з ґрунтом

№	Операція	Строк	Обсяг	Агрегат	W, га/год	Змін	Пальне, л	Примітка
12	Моніторинг сходів БПЛА зі штучним інтелектом	травень	100.0 га	оператор БПЛА + DJI Mavic 3M + карта густоти й зон ризику	80.0	0.2	5	виявлення прогалин, бур’янів, стресу
13	Підкошування бур’янів у рік сівби за потреби	червень	100.0 га	John Deere 6R 145 + мульчувач/косарка 3 м	2.8	6.0	500	без пошкодження точки росту
14	Обліт перед першим укосом і прогноз строку скошування	кінець травня-червень	100.0 га	оператор БПЛА + AI-оцінка висоти, NDVI, неоднорідності	80.0	0.2	5	вибір ділянок першочергового збирання
15	Скошування першого укосу у фазі бутонізації	червень	100.0 га	John Deere 6R 145 + CLAAS DISCO 3200 C CONTOUR, косарка-плющилка	2.6	6.4	600	висота зрізу 7-8 см
16	Ворушіння маси першого укосу	червень	100.0 га	John Deere 6R 145 + модернізована ВРМ-Ф-7,5	6.3	2.6	300	м’яке розпушення валків, зменшення втрат листя
17	Згрібання у валки першого укосу	червень	100.0 га	John Deere 6R 145 + CLAAS LINER 2900	7.0	2.4	250	валок під прес-підбирач
18	Пресування сіна першого укосу	червень	100.0 га	John Deere 6R 185 + KRONE Comprima F 155 XC	3.0	5.6	550	вологість сіна 15-18%
19	Підбирання, транспортування і складування тюків першого укосу	червень	100.0 га	трактор + платформа + причіп-платформа 12-14 т	4.0	4.2	450	зберігання під навісом
20	Післяукісне внесення калійних добрив	червень-липень	100.0 га	John Deere 6R 145 + Amazone ZA-TS	15.0	1.1	180	К30-45 після укосу
21	Скошування другого укосу	липень	100.0 га	John Deere 6R 145 + CLAAS DISCO 3200 C CONTOUR	2.6	6.4	600	фаза початку бутонізації
22	Ворушіння другого укосу	липень	100.0 га	John Deere 6R 145 + модернізована ВРМ-Ф-7,5	6.3	2.6	300	1-2 проходи залежно від погоди
23	Згрібання другого укосу	липень	100.0 га	John Deere 6R 145 + CLAAS LINER 2900	7.0	2.4	250	формування рівномірного валка
24	Пресування другого укосу	липень	100.0 га	John Deere 6R 185 + KRONE Comprima F 155 XC	3.0	5.6	550	контроль вологості
25	Транспортування сіна другого укосу	липень	100.0 га	трактор + платформа + причіп-платформа 12-14 т	4.0	4.2	450	уникати намокання тюків
26	Моніторинг відростання і шкідливих організмів БПЛА	липень-серпень	100.0 га	оператор БПЛА + Mavic 3M + AI-класифікація зон стресу	80.0	0.2	5	карта пріоритетного огляду
27	Скошування третього укосу	серпень-вересень	100.0 га	John Deere 6R 145 + CLAAS DISCO 3200 C CONTOUR	2.5	6.7	600	не пізніше 4-5 тижнів до морозів

№	Операція	Строк	Обсяг	Агрегат	W, га/год	Змін	Пальне, л	Примітка
28	Ворушіння третього укосу	серпень-вересень	100.0 га	John Deere 6R 145 + модернізована ВРМ-Ф-7,5	6.0	2.8	300	бережний режим роботи
29	Згрібання третього укосу	серпень-вересень	100.0 га	John Deere 6R 145 + CLAAS LINER 2900	6.8	2.5	250	мінімум проходів
30	Пресування третього укосу	серпень-вересень	100.0 га	John Deere 6R 185 + KRONE Comprima F 155 XC	2.8	6.0	550	вологість 15-18%
31	Транспортування сіна третього укосу	серпень-вересень	100.0 га	трактор + платформа + причіп-платформа 12-14 т	4.0	4.2	450	облік маси і якості
32	Осінній контроль густоти травостою, оцінка перезимівлі та план ремонту посівів	вересень-жовтень	100.0 га	оператор БПЛА + агроном + AI-звіт, карти проблемних зон	80.0	0.2	5	основа для плану наступного року
Разом						102.5	12035	Машинний час: 615.2 год

2.5. Календарний план і графік завантаження техніки

Для умов Полісся найнапруженішими періодами є квітень, коли необхідно швидко підготувати поле і провести сівбу, а також червень-липень, коли виконуються перший і другий укоси. Восени навантаження формується за рахунок основного обробітку, вапнування та підготовки поля під наступні посіви. Графік завантаження дає змогу визначити, чи достатньо одного комплекту машин для виконання робіт у нормативні строки.

Таблиця 2.5 – Розрахункове завантаження техніки за місяцями

Місяць	Основні операції	Машино-години	Особливості організації робіт
Берез.	закриття вологи	5.9	закриття вологи за фізичної стиглості ґрунту
Квіт.	культивація, коткування, сівба, підготовка насіння	76.4	передпосівна підготовка, сівба, коткування
Трав.	БПЛА-моніторинг сходів	1.2	моніторинг сходів, оцінка густоти
Черв.	перший укіс та заготівля сіна	167.3	перший укіс, ворушіння, згрібання, пресування
Лип.	другий укіс, підживлення	130.9	другий укіс і післяукісне підживлення
Серп.	БПЛА-моніторинг, частина третього укосу	77.7	моніторинг відростання, підготовка до третього укосу
Верес.	третій укіс, осінній контроль, лущення	85.2	третій укіс, транспортування, осінній моніторинг
Жовт.	вапнування, добрива, оранка	70.6	вапнування, оранка, основний обробіток

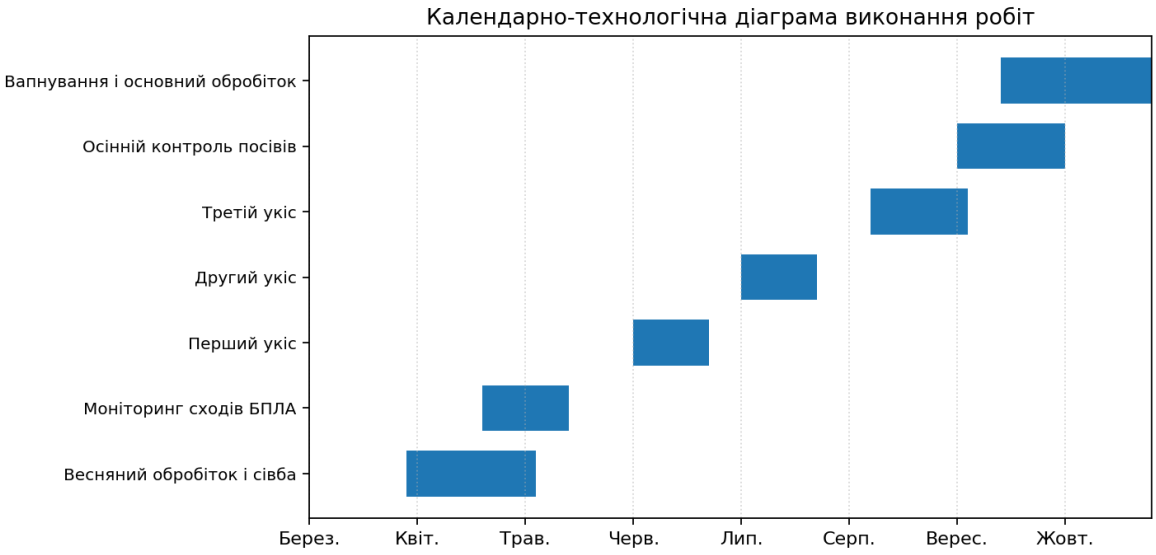


Рис. 2.2. Календарно-технологічна діаграма виконання робіт

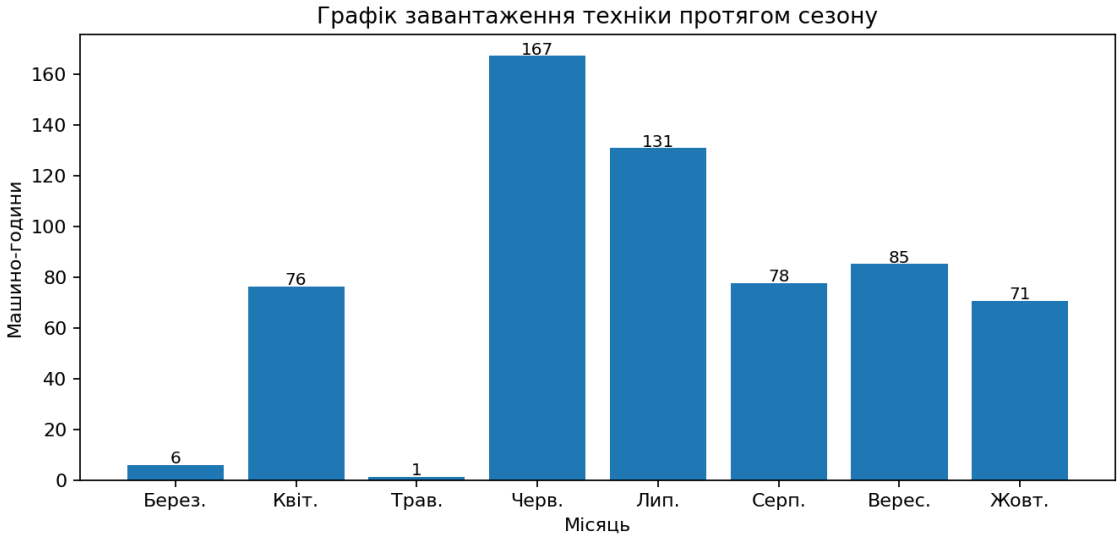


Рис. 2.3. Графік завантаження техніки протягом сезону.

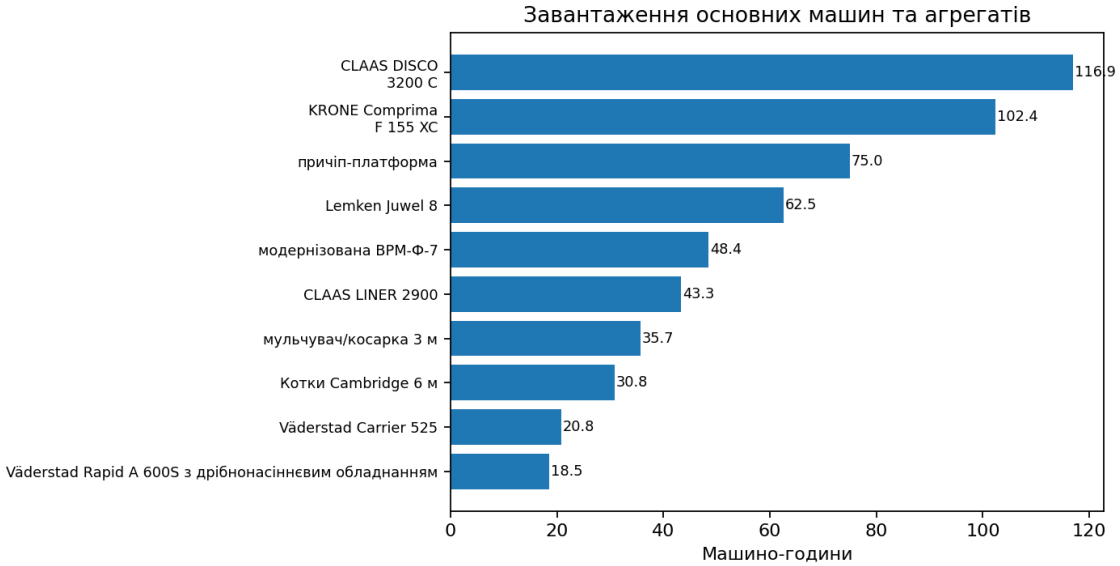


Рис. 2.4. Завантаження основних машин та агрегатів.

За наведеним графіком найбільше завантаження припадає на сінозаготівельні операції. Косарка-плющилка, ворушилка, граблі та прес-підбирач мають працювати узгоджено, оскільки затримка хоча б однієї операції збільшує втрати поживних речовин і ризик потрапляння сіна під дощ. У разі несприятливого прогнозу погоди першочергово скошують ділянки з найвищою готовністю до укосу, визначені за даними БПЛА та польового огляду.



Рис. 2.5. Структура витрат машинного часу за групами робіт.

2.6. Особливості виконання основних технологічних операцій

Підготовка ґрунту під люцерну має бути спрямована на створення вирівняного, дрібногрудочкуватого, достатньо ущільненого посівного шару. Насіння люцерни дрібне, тому надмірна глибина загортання є однією з найпоширеніших причин зрідження сходів. У проектованій технології передбачено передпосівне і післяпосівне коткування, що забезпечує контакт насіння з вологим ґрунтом і рівномірне проростання. У Поліссі важливо не проводити передпосівний обробіток по перезволоженому ґрунту, щоб уникнути замазування та утворення плужної підошви.

Сівбу рекомендовано виконувати у ранньовесняний період, коли ґрунт уже досяг фізичної стиглості, але ще містить достатній запас вологи. Норма висіву прийнята 18 кг/га, що для площі 100 га становить 1,8 т насіння. Перед сівбою насіння обробляють інокулянтом, щоб підвищити активність азотфіксації. Внесення стартового азоту для люцерни обмежують, а основний акцент роблять на фосфорі, калії, сірці, магнії та кальції.

Заготівля сіна проводиться у фазі бутонізації - початку цвітіння, коли поєднуються висока врожайність і добра кормова якість. Косарка-плющилка прискорює підсихання стебел, а модернізована ворушилка ВРМ-Ф-7,5 повинна працювати у режимі, який забезпечує піднімання та розпушення маси без агресивного ударного контакту зубів із ґрунтом. Надмірне ворушіння, особливо за низької вологості, збільшує втрати найцінішої листкової частини, тому кількість проходів визначають за фактичною вологістю маси, прогнозом погоди та станом валків.

Таблиця 2.6 – Рекомендовані параметри виконання операцій заготівлі сіна

Операція	Оптимальний стан маси	Агротехнічна вимога	Ризик порушення	Заходи зниження втрат
Скошування	фаза бутонізації, ранкові години після підсихання роси	висота зрізу 7-8 см	забруднення землею, ослаблення відростання	регулювання висоти зрізу, гострі ножі
Плющення	стебла соковиті, листя не пересушене	рівномірне роздавлювання стебел	надмірне травмування листя	помірний тиск вальців/пальців
Ворушіння	маса підв’ялена, але листя еластичне	рівномірне розкидання без підгрібання землі	обламування листків, поломка зубів	модернізація граблин, малий зазор до ґрунту без контакту
Згрібання	вологість знижена, листя не кришиться	валок рівний і доступний для підбирача	забруднення і нерівномірний валок	робота вранці або ввечері за наявності роси
Пресування	15-18% вологості	щільний тюк без перегрівання	пліснявіння або самонагрівання	вологомір, провітрюване зберігання

2.7. Очікувані виробничі показники проектованої технології

За умови якісного закладання посіву, підтримання оптимальної кислотності ґрунту та своєчасної заготівлі сіна очікувана урожайність у продуктивний рік може становити 6,5-8,0 т/га сіна. Для розрахункової площі 100 га це відповідає 650-800 т сіна за сезон. Частка першого укосу зазвичай є найбільшою, тому організація машинного комплексу повинна забезпечити його збирання у найкоротший строк. У розрахунках прийнято орієнтовну структуру урожаю: перший укіс - 40%, другий - 35%, третій - 25%.



Рис. 2.6. Орієнтовний розподіл урожайності сіна люцерни за укосами.

Таблиця 2.7 – Зведені показники проектованої технології.

Показник	Значення	Пояснення
Площа посіву	100 га	розрахункова площа для технологічної карти
Норма висіву	18 кг/га	загальна потреба насіння - 1,8 т
Кількість укосів	3	продуктивний рік використання травостою
Очікувана урожайність сіна	6,5-8,0 т/га	за сприятливих умов і правильного удобрення
Валовий збір сіна	650-800 т	для площі 100 га
Розрахункова потреба машинного часу	615.2 год	за всіма операціями технологічної карти
Розрахункова потреба змін	102.5	за 8-годинної зміни і К=0,75
Загальні витрати дизельного пального	12035 л	без урахування холостих переїздів і доставки матеріалів
Ключова модернізована машина	ворушилка ВРМ-Ф-7,5	підвищення надійності зубів і зменшення втрат листя

Таким чином, запроектована технологія вирощування люцерни на сіно для умов Полісся базується на адаптації агротехніки до кислих і перезволожених ґрунтів, точній сівбі, системному моніторингу БПЛА та раціональному поєднанні сінозаготівельних машин. Використання модернізованої ворушилки ВРМ-Ф-7,5 є обґрунтованим, оскільки операція ворушіння безпосередньо впливає на швидкість сушіння, якість сіна, втрати листків і надійність роботи всього комплексу машин. Запропонований графік завантаження техніки підтверджує, що для площі 100 га один комплект основних машин здатний виконати роботи у визначені строки за умови належної організації роботи, справності машин і оперативного реагування на погодні умови.

РОЗДІЛ 3
КОНСТРУКТИВНА ЧАСТИНА

3.1 Аналіз конструкцій машин для ворушіння, згрібання та перевертання трав

Під час заготівлі сіна та сінажу з люцерни особливе значення має своєчасне ворушіння і рівномірне розподілення скошеної маси по поверхні поля. Саме ці операції прискорюють видалення надлишкової вологи, зменшують втрати листкової частини і забезпечують стабільну роботу наступних машин потокової лінії. Конструкції сучасних ворушилок, граблів і машин для перевертання трав відрізняються кількістю роторів, способом агрегатування, типом приводу, формою граблин, конструкцією пружинних зубів та можливістю копіювання рельєфу поля.

У практиці кормовиробництва найпоширенішими є роторні машини, оскільки вони мають порівняно просту будову, велику ширину захвату, рівномірно обробляють прокоси і добре пристосовані до роботи на посівах багаторічних трав. Аналіз типових технічних рішень показує, що якість ворушіння значною мірою залежить від положення роторів відносно поверхні ґрунту, частоти їх обертання, пружності зубів та надійності вузлів кріплення граблин. Узагальнені конструктивні схеми машин для ворушіння, згрібання і перевертання трав наведено в додатку А

3.2 Призначення ворушилки ВРМ-Ф-7,5

Ворушилка ВРМ-Ф-7,5 призначена для механізованого ворушіння свіжоскошеної або частково підв’яленої маси люцерни, а також інших сіяних і природних трав. Машина розпушує прокоси, рівномірно розкидає траву після проходу валкових косарок і створює умови для швидшого та однаковішого підсушування рослинної маси по всій ширині захвату.

Агрегатується ворушилка з колісними тракторами тягового класу 9 або 14 кН. Передача обертання на робочі органи здійснюється від валу відбору

потужності трактора через карданну передачу та контрпривід із запобіжною муфтою. Основні технічні показники машини подано в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічна характеристика ворушилки ВРМ-Ф-7,5

Назва показника	Значення
Тип машини	причіпна
Ширина захвату, м, не менше: – при двох роторах – при чотирьох роторах – при шести роторах	 2,5 5,0 7,5
Продуктивність за годину основного часу з шістьма роторами, га/год	до 6,3
Конструктивна маса, кг, не більше	750
Кількість роторів, шт.	6
Кількість граблин на одному роторі, шт.	6
Привід робочих органів	від ВВП трактора
Частота обертання роторів, об/хв	180
Тип опорних коліс	пневматичні
Обслуговуючий персонал	тракторист

3.3 Будова і принцип роботи ворушилки

Конструктивно ворушилка складається з центрального модуля з двома роторами, лівого і правого середніх модулів, лівого і правого крайніх модулів, сниці для агрегатування з трактором, контрприводу із запобіжною муфтою, карданного вала, розтяжок, захисних огороджень та гвинтового механізму зміни кута нахилу роторів.

Під час руху агрегату ротори центрального, середніх і крайніх модулів обертаються попарно назустріч один одному. Пружинні зуби граблин підхоплюють скошену масу, що знаходиться перед роторами у прокосах або валках, розпушують її і відкидають позаду робочих органів. Завдяки цьому шар люцерни стає менш ущільненим, поліпшується доступ повітря до рослинної маси, а процес висушування відбувається інтенсивніше.

Машина може використовуватись як у повній комплектації, так і з частковим залученням модулів. За потреби працює лише центральний модуль, або центральний разом із середніми та крайніми модулями. Така схема підвищує універсальність ворушилки і дає змогу пристосовувати її до ширини прокосів, урожайності травостою та конкретних умов поля.

Якість виконання технологічного процесу безпосередньо залежить від правильного встановлення зазору між кінцями пружинних зубів і поверхнею ґрунту. Регулювання здійснюється упорним гвинтом, розташованим на сниці центрального модуля. Для налаштування ворушилку переводять у робоче положення, після чого загвинчуванням або відгвинчуванням упорного гвинта задають проміжок між зубами і ґрунтом не більше 15 мм.

Колісний хід кожного ротора може повертатися в горизонтальній площині та фіксуватися у робочому положенні. Середні й крайні модулі, крім робочого положення, мають також транспортне фіксоване положення, що полегшує переміщення агрегату дорогами і зменшує габарити машини під час транспортування.

Кожен із шести роторів має подібну будову і містить конічний редуктор, корпус із закріпленими граблинами, колісний хід та фіксатор. Основними робочими елементами є пружинні зуби, які закріплюються на граблинах за допомогою болтів, спеціальних шайб і гайок. Саме ці елементи безпосередньо контактують із рослинною масою та значною мірою визначають якість ворушіння.

Редуктори центрального і середніх модулів відрізняються від редукторів крайніх модулів наявністю додаткового вала-шестерні. За його допомогою крутний момент послідовно передається від центрального ротора до середнього, а від середнього — до крайнього. Така компоновка забезпечує узгоджену роботу всіх роторів і рівномірний розподіл навантаження в приводі.

Пневматичні опорні колеса зменшують опір перекочуванню, пом’якшують удари від нерівностей поля і менше руйнують структуру ґрунту порівняно з металевими колесами. Під час експлуатації необхідно контролювати тиск у шинах, не допускати потрапляння на них палива, мастил та інших нафтопродуктів, а також своєчасно очищати покришки від сторонніх предметів. У разі тривалого простою машину доцільно встановлювати на підставки, щоб уникнути деформації шин.

Вісь колісного ходу виконана як зварна конструкція: дугоподібна вісь призначена для встановлення ходових коліс, а вертикальний вал слугує опорою для редуктора. Рама модуля з'єднує між собою окремі частини ворушилки і одночасно виконує функцію захисного кожуха для вала, який передає крутний момент між модулями. Поперечина круглого перерізу приєднується до суміжного модуля за допомогою скоби, що дає можливість модулям переміщуватися один відносно одного у вертикальній площині та краще копіювати рельєф поля.

Сниця забезпечує приєднання ворушилки до трактора. Вона являє собою зварний вузол, на якому розміщені регулювальний гвинт і контрпривід. Розтяжки утримують середні модулі у заданому робочому положенні, а також виконують роль додаткового огородження центральної частини машини. Під час переведення ворушилки у транспортне положення розтяжки від'єднують від середніх модулів і закріплюють на сниці.

3.4 Обґрунтування модернізації робочих органів

У процесі роботи осі роторів ворушилки нахилені вперед у напрямку руху агрегату приблизно на 15–17°. За такого положення передня частина ротора розташовується ближче до поверхні поля, ніж задня. У результаті пружинні зуби, особливо під час руху по нерівному ґрунту, періодично контактують із виступами та ущільненими грудками. Це спричиняє ударні навантаження, підвищену вібрацію і прискорене втомне руйнування зубів.

Поломка пружинних пальців погіршує якість ворушіння, зменшує продуктивність агрегату і збільшує витрати на технічне обслуговування. Крім того, уламки металевих зубів можуть залишатися в рослинній масі. Їх потрапляння до прес-підбирачів, самозавантажувальних візків, подрібнювальних апаратів або кормозбиральних комбайнів може стати причиною пошкодження наступних машин технологічного комплексу.

Для підвищення надійності ВРМ-Ф-7,5 запропоновано модернізувати секцію робочих органів шляхом установлення шарнірного вузла на кожній

граблині. Шарнір дає можливість граблині відхилятися в осьовій площині ротора під дією короткочасного контакту з нерівністю ґрунту, а після проходження перешкоди повертатися у вихідне робоче положення. Це зменшує ударні навантаження на пружинні зуби та знижує ймовірність появи втомних тріщин.

Модернізований вузол доцільно виконати у вигляді вушка граблини, пальця шарніра, втулки, стопорного елемента і пружного обмежувача ходу. Втулка зменшує інтенсивність зношування, палець сприймає основне навантаження, а обмежувач не допускає надмірного відхилення граблини та забезпечує стабільне положення зубів під час нормального ворушіння трави. Загальну схему роботи модернізованої граблини наведено на рисунку 3.1.

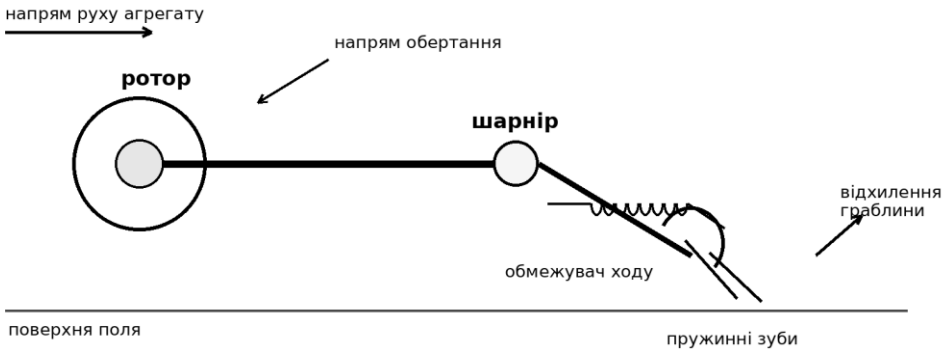


Рис. 3.1. Схема роботи шарнірної граблини модернізованої ворушилки.

Очікуваний технічний результат від запропонованого удосконалення полягає у зменшенні частоти безпосередніх ударів пружинних зубів об ґрунт, підвищенні довговічності робочих органів, скороченні простоїв через заміну зламаних пальців і підвищенні експлуатаційної безпеки наступних сінозбиральних машин. Для посівів люцерни така модернізація є особливо доцільною, оскільки культура має ніжну листкову частину, а надмірні удари та повторне ущільнення маси можуть призводити до додаткових втрат поживних речовин.

3.5 Розрахунки на міцність елементів конструкції ворушилки

Метою розрахунків є перевірка основних елементів ворушилки, що сприймають робочі та транспортні навантаження. До таких елементів належать опорні колеса роторів, осі коліс, ланцюгова муфта приводу, шпонкове з'єднання, підшипники валів і болтові з'єднання розтяжок. Розрахунки виконано для підтвердження достатньої міцності й роботоздатності вибраних деталей після модернізації робочих органів.

3.5.1 Розрахунок опорних коліс роторів

Ротори ворушилки спираються на опорні колеса з пневматичними шинами. Прийняті параметри колеса: діаметр 250 мм, ширина 100 мм. Колеса сприймають навантаження як під час виконання технологічного процесу, так і під час транспортування машини. Використання пневматичних шин є доцільним, оскільки вони мають менший опір перекочуванню та менше руйнують верхній шар ґрунту.

Мінімально допустимий діаметр колеса визначають за залежністю Грандвуане–Горячкіна, яка враховує опір перекочуванню колеса по ґрунту:

$$R_к = f(G, q, b, d) \tag{3.1}$$

де G – частина ваги агрегату, що припадає на одне колесо, Н; q – коефіцієнт об'ємного зминання ґрунту, q = 2,0–4,0 Н/см³; b – ширина колеса, b = 100 мм; d – діаметр колеса, мм.

З умови допустимого опору перекочуванню визначають мінімальний діаметр колеса:

$$d_{min} = f(G, q, b, R_к) \tag{3.2}$$

За результатами розрахунку прийнятий діаметр 250 мм забезпечує необхідну прохідність і стійке кочення ротора по поверхні поля. Отже, вибір опорного колеса для кожного ротора ворушилки є обґрунтованим.

Для осі, на якій встановлюється опорне колесо, небезпечним є переріз, у якому виникає найбільший згинальний момент. Він визначається за формулою:

$$M_{зг} = R_г \cdot l_B \tag{3.3}$$

де $R_г = R_0 \cdot \cos\beta$ – вертикальна складова опору ґрунту, Н; $l_В$ – плече прикладання сили Rг, м; прийнято $l_В = 0{,}070$ м.

Необхідний діаметр осі в небезпечному перерізі визначається з умови міцності на згин:

$$d \geq \sqrt[3]{(32 \cdot M_{зг} / (\pi \cdot [\sigma_{зг}]))} \qquad (3.4)$$

Розрахунок показує, що мінімальний діаметр осі повинен бути не меншим за 22 мм. Отже, за прийнятих навантажень вісь опорного колеса забезпечує необхідний запас міцності.

3.5.2 Розрахунок ланцюгової муфти з’єднання привідного вала з валом приводу роторів

Ланцюгова муфта призначена для передавання крутного моменту від привідного вала до вала приводу роторів і одночасно компенсує незначні перекоси осей валів. Розрахунковий крутний момент визначають з урахуванням потужності, частоти обертання вала та коефіцієнта експлуатації:

$$T_р = 9550 \cdot N \cdot K_е / n \qquad (3.5)$$

де N – потужність на привідному валу одного ротора, кВт; n – частота обертання вала, $хв^{-1}$; $K_е$ – коефіцієнт експлуатації, який враховує характер навантаження та умови роботи муфти.

Оскільки привід ворушилки працює з нерівномірними навантаженнями, можливими поштовхами, горизонтальним розташуванням валів, періодичним мащенням і двозмінним режимом роботи, коефіцієнт експлуатації приймають збільшеним. За результатами розрахунку вибрано ланцюгову муфту з кроком 25,4 мм, числом зубів 20 і роликовим ланцюгом ПР 25,4-6000. Номінальний крутний момент муфти становить 250 Н·м, що перевищує розрахункове значення.

Компенсуючі можливості прийнятої муфти: допустиме кутове зміщення осей валів — не більше 1°; допустиме радіальне зміщення — не більше 0,2 мм. Півмуфти доцільно виготовляти зі сталі з механічними властивостями не нижче сталі 45. Твердість зубів і впадин півмуфт повинна

перебувати в межах HRC 42–52. Під час складання на зуби півмуфт і ланки ланцюга наносять консистентне мастило.

3.5.3 Розрахунок шпонкового з’єднання привідного вала і півмуфти

Шпонкове з’єднання передає крутний момент від привідного вала до півмуфти ланцюгової муфти. За діаметром вала конструктивно прийнято призматичну шпонку 10×8×36 мм. Перевірку виконують за умовами міцності на зминання та зріз.

Напруження зминання у робочій частині шпонки визначають за залежністю:

$$\sigma_{зм} = 2 \cdot T / (d \cdot lp \cdot (h - t1)) \le [\sigma_{зм}] \quad (3.6)$$

де T – максимальний крутний момент, Н·мм; d – діаметр вала, мм; lp – робоча довжина шпонки, мм; h – висота шпонки, мм; t1 – глибина паза у валу, мм; [σзм] – допустиме напруження зминання.

Напруження зрізу визначають за формулою:

$$\tau = 2 \cdot T / (d \cdot b \cdot lp) \le [\tau] \quad (3.7)$$

де b – ширина шпонки, мм; [τ] – допустиме напруження зрізу для матеріалу шпонки.

Отримані значення напружень не перевищують допустимих для сталевого з’єднання вала і маточини. Отже, шпонка 10×8×36 мм забезпечує передавання крутного моменту без втрати міцності на зминання і зріз.

3.5.4 Вибір підшипників кочення валів приводу роторів

Роботоздатність підшипників кочення оцінюють за динамічною і статичною вантажопідйомністю, а також за розрахунковою довговічністю. З урахуванням умов роботи ворушилки для валів приводу роторів доцільно застосувати радіальні сферичні дворядні кулькові підшипники, які краще компенсують невеликі перекоси валів.

Номінальну довговічність підшипника в мільйонах обертів визначають за формулою:

$$L_{10} = (C / P)^{\wedge}p \quad (3.8)$$

де p – показник степеня, для кулькових підшипників p = 3; C – динамічна вантажопідйомність, C = 22,9 кН; P – еквівалентне навантаження.

Еквівалентне навантаження з урахуванням умов роботи визначають за залежністю:

$$P = V \cdot F_r \cdot K_б \cdot K_т \quad (3.9)$$

де V – коефіцієнт обертання, при обертанні внутрішнього кільця V = 1; F_r – радіальне навантаження, F_r = 0,562 кН; $K_б$ – коефіцієнт перевантаження, $K_б$ = 1,4; $K_т$ – температурний коефіцієнт, $K_т$ = 1,05.

Довговічність у годинах визначають за формулою:

$$L_h = 10^6 \cdot L_{10} / (60 \cdot n) \quad (3.10)$$

За результатами перевірки розрахункова довговічність відповідає вимогам експлуатації сільськогосподарської машини. Для валів приводу роторів приймається підшипник 1210, умови його вибору за вантажопідйомністю та довговічністю виконуються.

3.5.5 Розрахунок болтового з’єднання розтяжок середніх модулів

Розтяжки середніх модулів утримують робочі секції у заданому положенні, тому їх болтові з’єднання сприймають зусилля, що прагнуть змістити складові частини розтяжки одну відносно одної. У такому випадку болт працює переважно на зріз, а найбільш небезпечним є переріз у площині контакту з’єднуваних деталей. Схему болтового з’єднання наведено на рисунку 3.2.

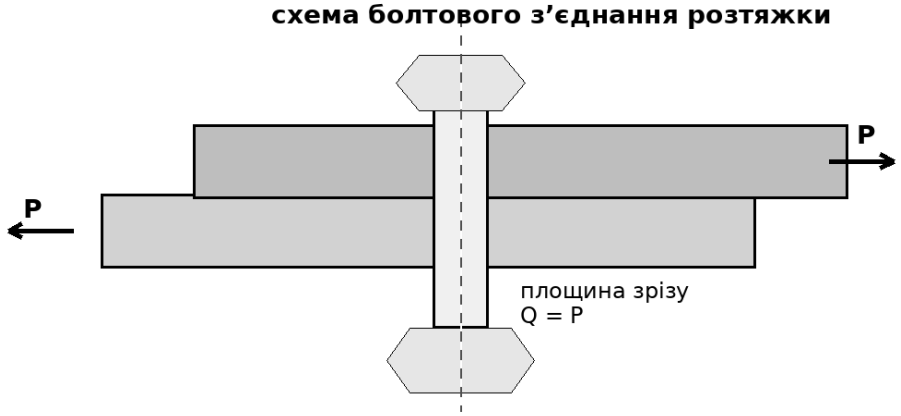


Рис. 3.2. Схема болтового з’єднання розтяжки середнього модуля.

Оскільки найбільша поперечна сила в площині поділу деталей дорівнює Q = P, напруження зрізу в болті визначають за формулою:

$$\tau = P / F \quad (3.11)$$

де τ – напруження зрізу, МПа; P – сила, що діє на з’єднання, Н; F – площа поперечного перерізу болта, мм².

Необхідний діаметр болта визначається з умови допустимого напруження зрізу:

$$d \geq \sqrt{(4 \cdot P / (\pi \cdot [\tau]))} \quad (3.12)$$

де [τ] – допустиме напруження при зрізі; для прийнятого матеріалу [τ] = 100 МПа.

Перевірку міцності болта виконують за співвідношенням:

$$\tau_ф = P / F \leq [\tau] \quad (3.13)$$

Розрахунок підтверджує, що умови міцності виконуються. Для з’єднання розтяжок середніх модулів приймається болт М16, який забезпечує необхідну несучу здатність і надійність роботи ворушилки в полі.

Висновок до конструктивної частини

У конструктивній частині розглянуто призначення, будову та роботу ворушилки ВРМ-Ф-7,5, яка використовується для ворушіння скошеної маси люцерни. Встановлено, що одним із найбільш навантажених і вразливих елементів машини є пружинні зуби граблин, які під час роботи можуть контактувати з нерівностями ґрунту та зазнавати ударних і вібраційних навантажень. Запропонована модернізація полягає у встановленні шарнірного вузла на кожній граблині, що дає змогу зменшити кількість жорстких контактів робочих органів із поверхнею поля. Виконані розрахунки підтверджують правильність вибору опорних коліс, осі колеса, ланцюгової муфти, шпонкового з’єднання, підшипника 1210 і болта М16. Застосування модернізованої секції робочих органів сприятиме підвищенню довговічності ворушилки, зменшенню витрат на ремонт і поліпшенню стабільності технологічного процесу заготівлі кормів із люцерни.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розглянуто актуальне питання підвищення ефективності виробництва сіна люцерни шляхом удосконалення технології вирощування культури, раціонального підбору машинно-тракторного парку та модернізації робочих органів ворушилки. Люцерна є однією з найцінніших багаторічних кормових культур, оскільки забезпечує високоякісний білковий корм для тваринництва, сприяє поліпшенню родючості ґрунту, збагачує його біологічним азотом і може формувати декілька укосів протягом вегетаційного періоду. Тому підвищення ефективності її вирощування має важливе виробниче, економічне та агротехнічне значення.

У першому розділі було проаналізовано існуючі технології вирощування люцерни в Україні та світі, розглянуто динаміку зміни посівних площ, а також сучасний стан виробництва багаторічних і однорічних трав на корм для галузі тваринництва. Встановлено, що розвиток кормовиробництва значною мірою залежить від рівня механізації, автоматизації та впровадження цифрових технологій у польові процеси. Особливе значення мають сучасні засоби контролю стану посівів, системи точного землеробства, використання БПЛА, супутникового моніторингу та автоматизованих машин, які дають змогу своєчасно виявляти проблемні ділянки поля, оцінювати густоту рослин, забур’яненість, вологозабезпечення та загальний стан травостою.

У другому розділі було спроєктовано технологію вирощування люцерни на сіно для умов зони Полісся. При цьому враховано ґрунтово-кліматичні особливості регіону, потребу у вапнуванні кислих ґрунтів, внесенні органічних і мінеральних добрив, якісній підготовці посівного ложа, своєчасній сівбі та правильній організації догляду за посівами. Розроблена технологічна карта включає повний комплекс операцій: основний і передпосівний обробіток ґрунту, удобрення, сівбу, коткування, моніторинг полів за допомогою БПЛА зі штучним інтелектом, скошування, ворушіння,

згрібання, пресування та транспортування сіна. Також було складено графік завантаження техніки, що дає можливість раціонально розподілити роботу машин протягом сезону, уникнути простоїв і забезпечити виконання технологічних операцій у найкращі агротехнічні строки.

У третьому розділі проведено аналіз конструкції ворушилки ВРМ-Ф-7,5, визначено її призначення, будову, принцип роботи та основні недоліки під час експлуатації. Встановлено, що під час роботи на нерівній поверхні поля пружинні зуби граблин часто контактують із ґрунтом, унаслідок чого виникають вібраційні навантаження, прискорене зношування, утворення втомних тріщин і поломки робочих органів. Це знижує надійність машини, погіршує якість ворушіння трав’яної маси та може призводити до потрапляння обламаних деталей у сіно, що є небезпечним для наступних сінозбиральних машин.

Для усунення виявлених недоліків запропоновано модернізацію ворушилки ВРМ-Ф-7,5 шляхом встановлення шарнірного вузла на граблинах, який забезпечує можливість їх повороту в осьовій площині ротора. Таке конструктивне рішення дозволяє зменшити жорсткий контакт пружинних зубів із нерівностями ґрунту, знизити динамічні навантаження на робочі органи, підвищити довговічність зубів і покращити стабільність технологічного процесу ворушіння. У роботі виконано необхідні інженерні розрахунки основних елементів конструкції, зокрема опорних коліс, осей, ланцюгової муфти, шпонкового з’єднання, підшипників і болтових з’єднань, що підтверджує працездатність і достатню міцність запропонованих рішень.

Отже, запропоноване удосконалення комплексу машин для вирощування люцерни на сіно з модернізацією ворушилки ВРМ-Ф-7,5 дає змогу підвищити продуктивність і надійність виконання польових робіт, скоротити втрати кормової маси, поліпшити якість сіна та зменшити експлуатаційні витрати. Практичне впровадження розроблених рішень є доцільним для аграрних підприємств зони Полісся, які займаються вирощуванням люцерни та заготівлею сіна для потреб тваринництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Борак К. В., Куликівський В. Л. Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів. Ч. 1: Теоретичні основи матеріалознавства : навч. посіб. Житомир : Поліський нац. ун-т, 2024. 101 с.

2. Войтюк Д. Г., Дубровін В. О., Іщенко Т. Д. та ін. Сільськогосподарські та меліоративні машини : підручник / за ред. Д. Г. Войтюка. Київ : Вища освіта, 2004. 544 с.

3. 2. Заєць М. Л., Куликівський В. Л. Вплив параметрів дискових сошників на здатність прорізання рослинних решток у системі NO-TILL. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2025. № 3 (130). С. 107–112.

4. Пастухов В. І., Чигрин А. Г., Джолос П. Л. та ін. Довідник з машиновикористання в землеробстві / за ред. В. І. Пастухова. Харків : Веста, 2001. 344 с.

5. Зінченко О. І. Кормовиробництво : підручник. Київ : Вища освіта, 2005. 448 с.

6. Зінченко О. І., Демидась Г. І., Січкар А. О., Приходько В. О. Кормовиробництво : практикум / за ред. О. І. Зінченка. Київ : Нора-прінт, 2015. 470 с.

7. Борак К.В., Савченко В.М., Корнійчук Ю.М. Робототехнічні засоби в рослинництві. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–18 жовтня 2025 року). Київ. НУБІП України. С. 589-601.

8. Технологія виробництва продукції рослинництва : навч. посіб. / за ред. С. І. Мельника. Київ : Аграрна освіта, 2010.

9. Коваленко О. А. Технологія виробництва продукції рослинництва : практична підготовка : навч. посіб. Миколаїв : МНАУ, 2021.

10. Державна служба статистики України. Площі, валові збори та урожайність сільськогосподарських культур : офіційна статистична

інформація. URL: https://stat.gov.ua/uk/releases/ploshchi-valovi-zbory-ta-urozhaynist-silskohospodarskykh-kultur-14 (дата звернення: 23.06.2026).

11. Державна служба статистики України. Посівні площі основних сільськогосподарських культур : набір відкритих даних. URL: https://data.gov.ua/dataset/10580e9e-6209-41a3-a21f-bcb09ec28340 (дата звернення: 3.06.2026).

12. FAOSTAT. Food and agriculture data. Food and Agriculture Organization of the United Nations. URL: https://www.fao.org/faostat/en/ (date of access: 3.06.2026).

13. FAO. Alfalfa. Land & Water. Crop Information. Food and Agriculture Organization of the United Nations. URL: https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/alfalfa/en/ (date of access: 3.06.2026).

14. Heuzé V., Tran G., Boval M., Lebas F. Alfalfa (Medicago sativa). Feedipedia, a programme by INRAE, CIRAD, AFZ and FAO. URL: https://www.feedipedia.org/node/275 (date of access: 3.06.2026).

15. Undersander D., Cosgrove D., Cullen E., Grau C., Rice M. E., Renz M., Sheaffer C., Shewmaker G., Sulc M. Alfalfa Management Guide. Madison : American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 2011. 59 p. URL: https://www.agronomy.org/files/publications/alfalfa-management-guide.pdf (date of access: 3.06.2026).

16. Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., Smith M. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome : FAO, 1998. URL: https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm (date of access: 3.06.2026).

17. Ohio State University Extension. Purchasing Hay Equipment: Tedders and Rakes. URL: https://cfaes.osu.edu/fact-sheet/purchasing-hay-equipment-tedders-and-rakes (date of access: 3.06.2026).

18. Iowa State University Extension and Outreach. Buyer’s Guide to Hay Equipment. URL: https://www.extension.iastate.edu/smallfarms/buyers-guide-hay-equipment (date of access: 3.06.2026).

19. DJI Agriculture. DJI Mavic 3M. Specifications. URL: https://ag.dji.com/mavic-3-m/specs (date of access: 23.06.2026).

20. Väderstad. Rapid A 400–800S. Pneumatic seed drill with high capacity. URL: https://www.vaderstad.com/en/drilling/rapid-seed-drills/rapid-a-s (date of access: 3.06.2026).

21. KRONE Agriculture. Vendro. Rotary tedders. URL: https://www.krone-agriculture.com/en/products/rotary-tedders/vendro (date of access: 3.06.2026).

22. John Deere. 6R 185 Tractor. Specifications. URL: https://www.deere.co.uk/en-gb/products-and-solutions/tractors/mid-size-tractors/6r-185-tractor-mdhtquw (date of access: 3.06.2026).

23. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. Luzerne: Anbau, Nutzung und Fütterung. URL: https://www.lfl.bayern.de/ (дата звернення: 3.06.2026).

24. Landwirtschaftskammer Niedersachsen. Luzerne im Ackerfutterbau: Anbau, Pflege und Nutzung. URL: https://www.lwk-niedersachsen.de/ (дата звернення: 3.06.2026).

25. Deutsche Saatveredelung AG. Luzerne: Sorten, Anbauempfehlungen und Nutzung im Futterbau. URL: https://www.dsv-saaten.de/ (дата звернення: 3.06.2026).

26. DLG e. V. Futterkonservierung und Grundfutterqualität: Empfehlungen für die Praxis. Frankfurt am Main : DLG-Verlag, 2020. URL: https://www.dlg.org/ (дата звернення: 23.06.2026).

27. KRONE Agriculture. Kreiselzettwender Vendro: Technische Daten und Einsatzbereiche. URL: https://www.krone-agriculture.com/de/ (дата звернення: 3.06.2026).

28. CLAAS KGaA mbH. VOLTO Kreiselzettwender: Produktinformation und technische Daten. URL: https://www.claas.com/de-de/ (дата звернення: 23.06.2026).

29. Pöttinger Landtechnik GmbH. HIT Kreiselzettwender: Technik für die Heuernte. URL: https://www.poettinger.at/de_de/ (дата звернення: 23.06.2026).

30. Fendt. Traktoren und Futtererntetechnik für den professionellen Einsatz in der Landwirtschaft. URL: https://www.fendt.com/de/ (дата звернення: 23.06.2026).