

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу**

**Кваліфікаційна робота
на правах рукопису**

КУЦЕРУБА В'ЯЧЕСЛАВ ЯРОСЛАВОВИЧ

УДК 631.2.01:633.3.02

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ НОЖОВОГО РОЛЕРА
ДЛЯ ПОДРІБНЕННЯ ПОЖНИВНИХ РЕШТОК**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ В. Я. Куцераба

Керівник роботи

Заєць М. Л.

кандидат технічних наук, доцент

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Куцериба В'ячеслав Ярославович. Дослідження ефективності роботи ножового ролера для подрібнення пожнивних решток. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістр за спеціальністю 208 Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

У роботі розглянуто ефективність роботи ножового ролера під час подрібнення пожнивних решток за різних технологічних режимів. Проаналізовано вплив конструкційних параметрів, швидкісного режиму та інтенсивності подрібнення на якість руйнування стеблової маси.

У сучасних системах землеробства, зокрема нульового обробітку ґрунту, зростає потреба у високоефективних засобах подрібнення та рівномірного розподілу пожнивних решток.

Проаналізовано вплив робочої швидкості, типу робочих елементів, кута їх встановлення, маси ролера та ступеня вологості стебел на якість подрібнення та рівномірність розподілу пожнивних залишків по поверхні поля.

Аналіз проведених дослідів дозволяє встановити закономірності зміни таких показників, як коефіцієнт подрібнення, фракційний склад отриманої мульчі, ступінь пошкодження стебел, інтенсивність повторного проростання бур'янної рослинності, опір руху агрегату та енергетичні витрати.

Результати дослідження можуть бути використані під час вдосконалення конструкцій ножових ролерів, обґрунтування їх параметрів і режимів роботи, а також у практиці господарств, що впроваджують технології захисту ґрунту, мінімізації обробітку та підвищення ефективності післязбирального догляду за полем.

Ключові слова: ефективність роботи, ножовий ролер, аналіз досліджень, параметри, закономірності.

ABSTRACT

Viacheslav Kutseruba. Study of the Efficiency of a Knife Roller for Shredding Crop Residues. – *Qualification thesis, manuscript.*

Qualification thesis for obtaining the Master's degree in specialty 208 Agroengineering. – *Polissia National University, Zhytomyr, 2025.*

The thesis examines the efficiency of a knife roller during shredding of crop residues under various technological conditions. The influence of design parameters, operating speed, and shredding intensity on the quality of stem biomass destruction has been analyzed.

In modern farming systems, particularly under zero-tillage practices, the demand for highly efficient tools for shredding and uniform distribution of crop residues is increasing.

The study analyzes the impact of operating speed, type of working elements, their installation angle, roller weight, and stem moisture on the quality of shredding and the uniformity of residue distribution across the field surface.

The analysis of the conducted experiments makes it possible to determine the patterns of changes in indicators such as the shredding coefficient, the fractional composition of the resulting mulch, the degree of stem damage, the intensity of weed regrowth, implement draft resistance, and energy consumption.

The research results may be used to improve the design of knife rollers, justify their parameters and operating modes, and in the practice of farms implementing soil-conservation technologies, reduced tillage, and improved post-harvest field management.

Keywords: *operational efficiency, knife roller, research analysis, parameters, patterns.*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1.СТАН ПИТАННЯ ТА ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ НОЖОВИХ РОЛЛЕРІВ	
1.1. Огляд літератури та аналіз конструкцій ножових ролерів.....	7
1.2. Аналіз технологічних показників роботи ножових ролерів.....	10
Висновки до розділу 1.....	12
2.ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ НОЖОВОГО ПОДРІНЮВАЧА РОЛЕРНОГО ТИПУ	
2.1. Проектування та дослідження ротаційного ножового ролера для подрібнення рослинних пожнивних решток.....	13
2.2. Конструювання та аналіз основних складальних одиниць запропонованого пристрою.....	15
Висновки до розділу 2.....	19
3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ МОДЕЛІ НОЖОВОГО РОЛЕРА	
3.1. Показники роторного ножового ролера подрібнення решток.....	20
3.2. Конфігурація та конструктивні параметри рухомих ножів.....	21
3.3. Технологічні та конструктивні параметри нерухомого ножа.....	24
3.4. Аналіз опору різанню змішаних пожнивних решток.....	26
3.5. Аналіз динамічних характеристик роботи ролерного подрібнювача...	28
Висновки до розділу 3.....	31
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	33
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	34

ВСТУП

Актуальність теми. Пожнивні рештки є важливим елементом сучасних агротехнологій, оскільки вони забезпечують збереження родючості ґрунту, сприяють накопиченню органічної речовини та зменшують ерозійні процеси. Водночас високостеблова маса після збирання сільськогосподарських культур може ускладнювати проведення наступних технологічних операцій, знижувати якість обробітку ґрунту та збільшувати енергетичні витрати.

Ножові ролери широко застосовуються як інструменти для механічного руйнування та подрібнення пожнивних решток. Їхня ефективність залежить від конструкційних характеристик, способу встановлення, швидкості руху агрегату та фізичних властивостей рослинних решток. Незважаючи на широке застосування, питання оптимізації роботи ножових ролерів, оцінки якості подрібнення та впливу цих факторів на подальші агротехнологічні процеси залишаються актуальними. Тому дослідження параметрів роботи ножового ролера є важливим для забезпечення якісного подрібнення пожнивних решток, підвищення рівня біологічної активності ґрунту та зменшення навантаження на ґрунтообробну техніку.

Мета роботи. Оцінка ефективності роботи ножового ролера для подрібнення пожнивних решток шляхом обґрунтування його експлуатаційних параметрів.

Завдання дослідження:

- проаналізувати конструкційні особливості ножових ролерів та їх вплив на інтенсивність подрібнення пожнивних решток;
- визначити основні технологічні параметри роботи ролера;
- провести дослідження ефективності подрібнення пожнивних решток за різних технологічних режимів;
- встановити залежності між технологічними параметрами ролера та якістю подрібнення.

Об'єкт дослідження - технологічний процес подрібнення та розподілу пожнивних решток сільськогосподарських культур ножовим ролером.

Предмет дослідження - техніко-технологічні параметри роботи ножового ролера та їх вплив на якість подрібнення й рівномірність розподілу пожнивних решток на поверхні поля.

Методи дослідження: аналіз наукової та технічної літератури; польові експериментальні дослідження роботи ножового ролера; інструментальні вимірювання ступеня подрібнення та розподілу решток; статистичне опрацювання отриманих результатів; порівняльний аналіз ефективності з іншими технологіями подрібнення.

Перелік публікацій автора за темою роботи:

1. Заєць М. Л., Куцеруба В.Я. Обґрунтування параметрів подрібнювального пристрою для поверхневого обробітку ґрунту. Зб. праць XI Міжнародної науково-практичної конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь» . Житомир: ЖТФК, 2025. С. 149-151.

2. Заєць М. Заєць М. Л., Куцеруба В.Я. Дослідження ножових ролерів для подрібнення пожнивних решток. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі: матеріали V Міжнар. наук.-практ. конференції молодих учених. Запоріжжя: ТДАТУ, 2025. С. 160-162.

3. Заєць М. Л., Куцеруба В.Я. Дослідження ножових ролерів для подрібнення пожнивних решток. Зб. тез доп. XXVI Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" НУБіПУ. Київ. 2025. С. 167-171.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 18 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 36 сторінок комп'ютерного тексту, 14 рисунків та 3 таблиці.

1. СТАН ПИТАННЯ ТА ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ НОЖОВИХ РОЛЕРІВ

1.1. Огляд літератури та аналіз конструкцій ножових ролерів

Аналіз вітчизняних і зарубіжних наукових досліджень свідчить про активний розвиток теми подрібнення пожнивних решток за допомогою ножових (ріжучих) ролерів, а також про пошук оптимальних конструкцій та технологічних режимів, які забезпечують ефективність, надійність та енергетичну економічність цього процесу.

У сучасному агровиробництві подрібнення пожнивних решток за допомогою активних робочих органів машин є важливою технологічною операцією. Як показано в роботах Сало, Богатирьова та Лещенка, надійність процесу подрібнення значною мірою залежить від кута встановлення ножів на барабані ролера, а також від конструкції барабана, зокрема його діаметра.



Рис. 1.1. Загальний вигляд експериментального котка-подрібнювача рослинних решток ПК-4,5

Джерело: розроблено авторами Сало, Богатирьова та Лещенко [1]

Так, у дослідженні Сало, Лещенка та Богатирьова (2021) було встановлено, що при збільшенні кута «розхилу» між ножами та зростанні швидкості руху агрегату ймовірність забивання міжножового простору значно зменшується, навіть за підвищеної вологості рослинно-грунтової маси. [1] Такі результати

підкреслюють важливість точного конструктивного налаштування ріжучого барабана для ефективного подрібнення.

У подальшій роботі (Сало, Богатирьов, Лещенко, 2023) продовжено дослідження надійності технологічного процесу, де проаналізовано як приводні, так і не приводні ролери. Автори визначили, що раціональні значення кута лез та конструктивного зміщення рядів ножів дозволяють практично повністю уникнути забивання міжножового простору рослинними стеблами й ґрунтом, що значно підвищує надійність агрегату. [2]



Рис. 1.2. Накопичення рослинних пожнивних решток кукурудзи між ножами барабана

Джерело: розроблено авторами[2]

Також роботи Філіп'єва (2024) присвячені удосконаленню приводу ножів подрібнювача. У них показано, що активні робочі органи із поліпшеним приводом забезпечують більш рівномірне розподілення подрібнених решток по поверхні поля та знижують енерговитрати агрегату. [3]

Зі сторони практики, в огляді конференційних матеріалів подано пропозиції щодо застосування котка-подрібнювача з ножами, встановленими за спіраллю, що знижує ризик забивання міжножового простору та забезпечує рівномірне укладання рослинних решток на поверхні ґрунту. [4]

Халізів (2023) також звертав увагу на параметри ножів: у його роботі обґрунтовано раціональні значення гостроти та розміщення ножів для покращення якості подрібнення і мінімізації руйнувань структури ґрунту. [5]

Рылупака, Нроpost, Nesvidomin та ін. (2024) запропонували новий підхід до конструювання ножів ролера — гвинтоподібні (гелічні) ножі для барабана подрібнювача, що зменшують динамічні ударні навантаження під час технологічного процесу і підвищують надійність. [6]

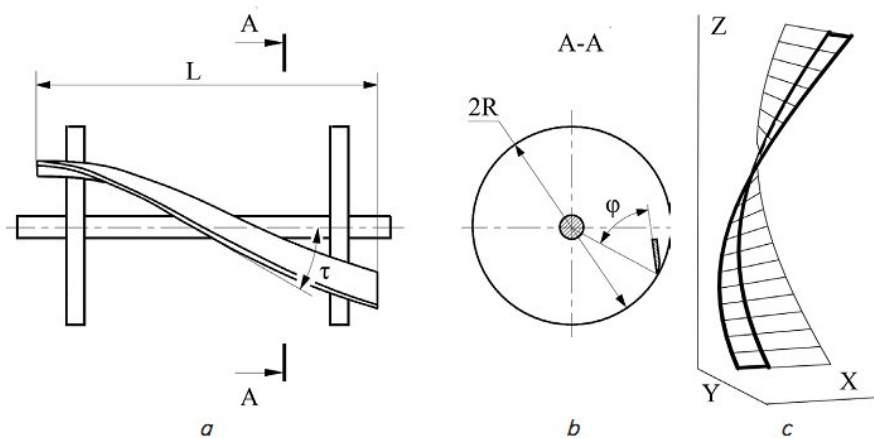


Рис. 1.3. Графічне зображення форми гвинтового ножа на складеній поверхні:

- а – схема розташування ножа на барабані з горизонтальною віссю обертання;
- б – вид збоку, на якому лезо ножа проектується дугою кола;
- с – просторове зображення ножа у вертикальному положенні як переріз гвинтової поверхні.

Джерело: розроблено авторами[6]

У дослідницькій роботі El-Khateeb & El-Keway (2012) про подрібнювач пожнивних решток було вивчено вплив форми ножів (гладкі проти зубчастих) і швидкості ріжучої головки на ефективність подрібнення сухих і вологих решток (стебла бавовни, солома).

Zhang, Xie, Du, Huang та Yue (2025) спроектували роторний подрібнювач з «ротаційним» типом ножів, використовуючи принцип «одинакової опорної

різання та косого різання», та визначили оптимальні параметри (швидкість ножів, зазор між рухомим та нерухомим лезом), які знижують енергоспоживання та підвищують якість різки. [7]

Ще одне міжнародне дослідження (ResearchGate) присвячено вивченню інженерних факторів, що впливають на працездатність подрібнювачів пожнивних решток, зокрема механічних властивостей стебел та конструкції робочих органів. [8]

Крім того, у публікації Reducing vibration while maintaining efficacy of rollers to terminate cover crops розглядається, як різні дизайни жалів (blade) ролера впливають на вібрацію агрегату, зберігаючи ефективність «викорінення» покривних культур. [9]

Таким чином, аналіз літературних джерел демонструє, що головними напрямками вдосконалення ножових ролерів є:

- оптимізація кута встановлення ножів,
- удосконалення приводу робочих органів,
- зміна геометрії барабана (діаметр, ряди ножів),
- застосування нестандартних схем розташування ножів (наприклад, спіралевидне) для зменшення забивань.

Ці напрями підтверджують актуальність досліджень, спрямованих на підвищення ефективності, надійності та енергетичної економічності ножових ролерів у процесі подрібнення пожнивних решток.

1.2. Аналіз технологічних показників роботи ножових ролерів

Ефективність ножових ролерів визначається комплексом технологічних показників, що характеризують якість подрібнення пожнивних решток, продуктивність агрегату та енергетичні витрати. До основних показників належать:

Ступінь подрібнення пожнивних решток (S)

Визначається як відношення маси часток, що пройшли через сито певного

розміру, до загальної маси обробленої рештки. Дозволяє оцінити, наскільки ефективно ножі руйнують стеблову масу та чи утворюється дрібна фракція, придатна для мульчування. Рівномірність розподілу решток (R) вимірюється по площі контрольної ділянки поля та характеризує рівномірність укладання подрібненої маси. Чим нижче значення R , тим більш рівномірно розподілені рештки, що сприяє оптимальним умовам для наступних технологічних операцій.

Продуктивність агрегату (P) визначається як оброблена площа за одиницю часу (га/год). Енергетичні витрати (E) оцінюються через вимірювання тягового опору агрегату та витрат пального. Цей показник дозволяє порівнювати ефективність різних конструкцій ролерів. [10]

Довжина та фракційний склад подрібнених часток, кількість часток певної довжини вимірюється методом просіювання через сита різного розміру або шляхом аналізу. Забезпечує оцінку якісного подрібнення: коротші частки сприяють швидшому розкладанню і кращому мульчуванню.

Надійність роботи (N) включає показники: частоту забивання ножів, пошкодження ножів, знос барабана та потребу у технічному обслуговуванні. Визначається експериментально при різних швидкостях і умовах поля. [9]

Вплив швидкості руху агрегату (V), при збільшенні швидкості зростає продуктивність P , але може знижуватися ступінь подрібнення S через менший контакт ножів із стеблами. Рівномірність розподілу R погіршується при високих швидкостях через нестабільність укладання маси. Вплив кута встановлення ножів (α), збільшення кута до оптимального значення підвищує ефективність подрібнення та зменшує ймовірність забивання. [10]

Неправильний кут може збільшити тягові витрати та знизити якість розподілу решток.

Вологість рослинних решток (W) висока вологість збільшує ймовірність налипання стебел, знижує ступінь подрібнення і підвищує енергетичні витрати.

Сухі рештки легше подрібнюються, але можуть створювати пил і розсіювання часток. [11]

Висновки до розділу 1.

Встановлено чітку тенденцію до оптимізації конструкції ножів (геометрія лез, кут їх розміщення, гвинтові форми) для підвищення надійності і зменшення забивання.

Технологічні режими (швидкість агрегату, швидкість обертання барабана, зазори між лезами) критично впливають на якість подрібнення, витрати енергії та стабільність роботи.

Вивчення вібрацій, зносу ножів, а також механічних властивостей рослинних решток є важливою складовою, оскільки вони визначають експлуатаційну надійність і продуктивність подрібнювачів.

Зарубіжні дослідження доповнюють вітчизняні, пропонуючи інноваційні підходи (наприклад, гвинтоподібні ножі, гібридні режими різки), які можуть бути адаптовані для подрібнення пожнивних решток у контексті українського землеробства.

Головними напрямками вдосконалення ножових ролерів є оптимізація кута встановлення ножів, удосконалення приводу робочих органів, зміна геометрії барабана (діаметр, ряди ножів), застосування нестандартних схем розташування ножів (наприклад, спіралевидне) для зменшення забивань. Ці напрями підтверджують актуальність досліджень, спрямованих на підвищення ефективності, надійності та енергоощадності ножових ролерів у процесі подрібнення пожнивних решток.

2.ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ НОЖОВОГО ПОДРІНЮВАЧА РОЛЕРНОГО ТИПУ

2.1. Проектування та дослідження ротаційного ножового ролера для подрібнення рослинних пожнивних решток

2.1.1. Конструкція адаптивної моделі машини

Ротаційний ножовий пристрій для подрібнення рослинних решток, складається з адаптивного подавального механізму, механізму подрібнення, системи приводу та рами.

Адаптивний подавальний механізм включає конвеєрну стрічку, подавальні елементи та систему регулювання зазору. Подавальні елементи розташовані над конвеєрною стрічкою та з'єднані з задньою частиною механізму подрібнення. Загальна конструкція пристрою наведена на рис. 1а.

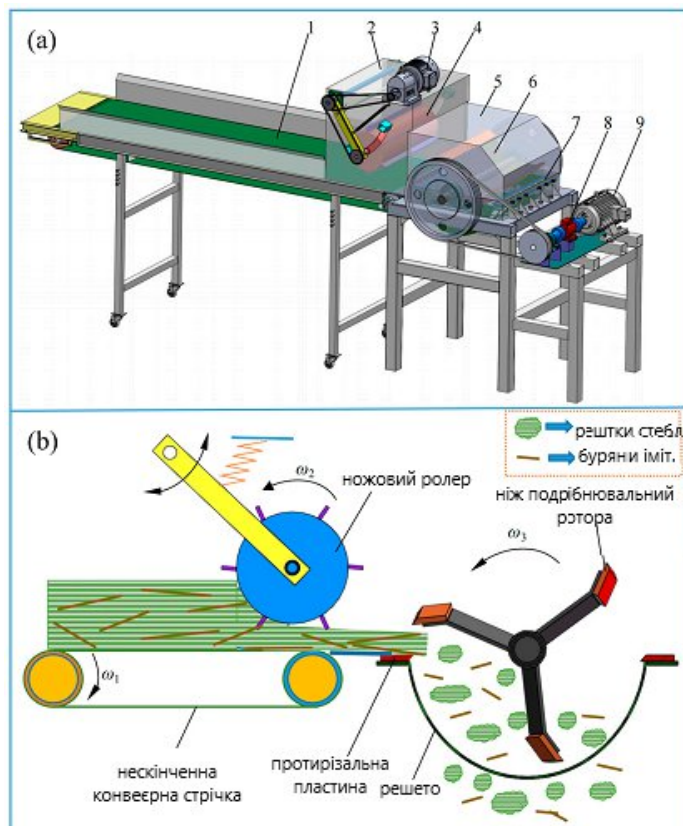


Рис. 2.1. Схематична діаграма інтегрованої конструкції та принципу роботи

(а) Загальна конструкція. (б) Принцип роботи.

1 – конвеєрна стрічка; 2 – адаптивний подавальний механізм; 3 – привідний двигун подавального механізму; 4 – подавальний валець; 5 – механізм подрібнення; 6 – ротаційний ножовий подрібнювач; 7 – нерухоме лезо; 8 – датчик крутного моменту; 9 – двигун приводу ролера подрібнювача.

2.1.2. Принцип роботи та технічні параметри

Як показано на рисунку 1b, під час роботи всі двигуни приводяться в дію, а змішані з бур'янами рослинні рештки завантажуються на конвеєрну стрічку. Досягнувши подавального механізму, подавальний валець рівномірно та плавно подає об'ємні змішані стеблові рештки з коливаннями у механізм подрібнення, ефективно усуваючи явище забивання камери подрібнення, спричинене нерівномірністю подачі.

Одночасно подавальний валець стискає змішані рештки та створює позитивний тиск. Ротаційний ножовий подрібнювач обертається з високою швидкістю, а рухоме та нерухоме леза працюють узгоджено. Під дією тиску з боку подавального вальця застосовується принцип «однобічного різання + різання з ковзанням» для подрібнення змішаних решток.

Подрібнені рештки, що відповідають необхідній довжині, проходять крізь решето під дією повітряного потоку та відцентрової сили, створеної обертанням подрібнювача. Ті фрагменти, що не відповідають вимогам за довжиною, повторно зрізаються нерухомим лезом у камері подрібнення, після чого цикл завершується. Основні конструктивні параметри пристрою наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1.

Параметри	Значення
Габаритні розміри (довжина × ширина × висота), мм	4810 × 1240 × 2450
Продуктивність, кг·год ⁻¹	600
Ширина захвату, мм	800
Необхідна потужність механізму подрібнення, кВт	18,5

Необхідна потужність подавального механізму, кВт	5,0
Необхідна потужність конвеєрної стрічки, кВт	1,5
Швидкість транспортування, м·с ⁻¹	0,2
Частота обертання подавального валка, об·хв ⁻¹	25–40
Зазор між рухомим і нерухомим лезами, мм	0,5–2,0
Частота обертання подрібнювального барабана, об·хв ⁻¹	120–320

2.2. Конструювання та аналіз основних складальних одиниць запропонованого пристрою

Як показано на рис 2.2а, подавальний механізм складається з подавального двигуна, першого і другого зірочкового блоку, рами та подавального вальця. Двигун приводить у рух подавальний валець через перший і другий блоки зірочок.

Вузол регулювання зазору включає поворотний вал, пружину розтягу, поворотний важіль, напрямний паз і обмежувальний блок. Під час роботи лінійна колова швидкість нижньої частини подавального вальця збігається з напрямком руху конвеєрної стрічки. Коли виникають коливання у величині подачі змішаних плівкових решток, подавальний валець адаптивно переміщується вгору або вниз вздовж напрямного паза навколо поворотного вала. Це забезпечує автоматичне, у режимі реального часу, регулювання зазору між подавальним вальцем і конвеєрною стрічкою, гарантуючи, що на змішані рештки завжди діє необхідний тиск.

Подавальний механізм здійснює подачу змішаних решток за рахунок сили, яку створюють валець та конвеєрна стрічка. На основі теорії руйнування та зламу стебел за умов направленої подачі [11,12], проведено аналіз сил та руху, що діють на змішані рештки під час подачі, з метою забезпечення плавної подачі та запобігання блокуванню, як показано на рисунку 2b.

Як зазначено на рисунку 2b, необхідною умовою стабільної та рівномірної подачі змішаних решток є те, що сила тертя, яка діє на матеріал, повинна бути більшою або дорівнювати складовій нормальній сили, що виражається наступним чином:

$$F_a + F_b \geq F_2 \sin \alpha \quad (2.1)$$

$$\begin{cases} F_1 = mg + F_2 \cos \alpha + F_b \sin \alpha \\ F_a = F_1 \mu_a \\ F_b = F_2 \mu_b \end{cases} \quad (2.2)$$

У рівняннях (1) та (2):

F_1 - опорна сила, яку створює конвеєрна стрічка і діє на змішані рослинні рештки, Н;

F_2 - нормальна сила, яку створює подавальний вал на рештки, Н;

F_a - сила статичного тертя, що діє на рештки з боку конвеєрної стрічки, Н;

F_b - сила статичного тертя, що діє на рештки з боку подавального вальця, Н;

α - кут подачі, °;

μ_a - коефіцієнт статичного тертя між конвеєрною стрічкою та змішаними плівковими рештками;

μ_b - коефіцієнт тертя між подавальним вальцем і рештками;

m - маса решток, кг;

g - прискорення вільного падіння, м/с².

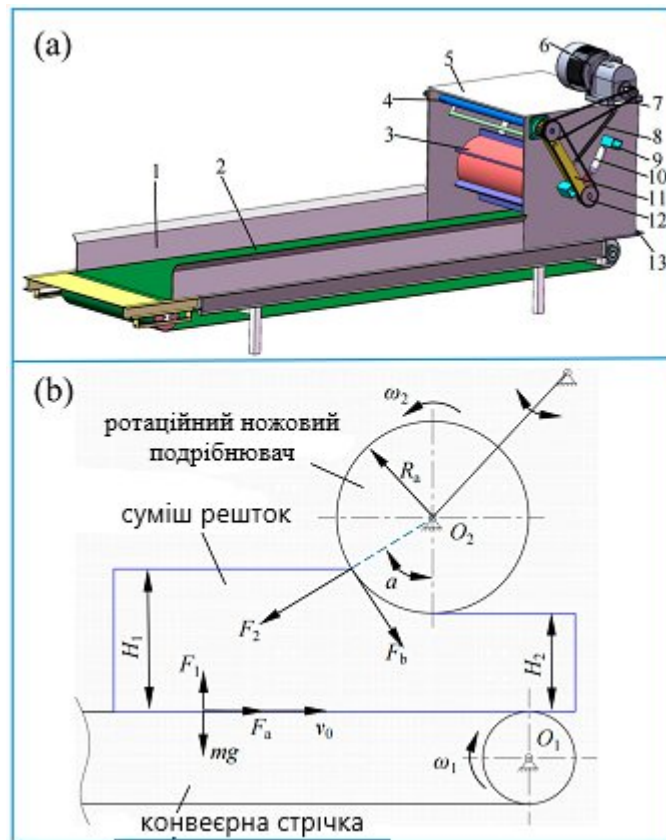


Рис. 2.2. Схематична діаграма адаптивного подального механізму.

(а) Загальна конструкція. (б) Принцип роботи.

1 – бокова плита; 2 – конвеєрна стрічка; 3 – подавальний валець; 4 – центральний поворотний вал; 5 – рама; 6 – двигун; 7 – перший блок зірочок; 8 – пружина розтягу; 9 – обмежувальний блок; 10 – напрямний паз; 11 – поворотний важіль; 12 – другий блок зірочок; 13 – нерухома плита.

Провівши перетворення рівнянь (2.1) і (2.2), отримали наступний вираз:

$$\frac{m_a mg}{F_1} + (m_a + m_b) \cos \alpha + m_a m_b \sin \alpha^3 \sin \alpha, \quad (2.3)$$

Оскільки в рівнянні (2.3) виконується умова $\mu_a m g / F_1 + (\mu_a + \mu_b) \geq 0$, достатня, щоб виконувалася нерівність $(\mu_a + \mu_b) \cos \alpha \geq (1 - \mu_a \mu_b) \sin \alpha$.

Відповідно до даних [13], коефіцієнт статичного тертя між конвеєрною стрічкою та змішаними плівковими рештками (μ_a) становить 0,44, а коефіцієнт статичного тертя між подавальним вальцем і рештками (μ_b) = 0,34. Розв'язавши цю нерівність, отримаємо, що кут подачі $\alpha \leq 42^\circ$. Це забезпечує рівномірну та ефективну подачу решток за умови достатнього притискного зусилля.

Ширина конвеєрної стрічки, діаметр подавального валка та його частота обертання безпосередньо впливають на захоплення, транспортувальну здатність і продуктивність подачі змішаних плівкових решток. Щоб забезпечити стабільну подачу та потрібну продуктивність, необхідно правильно встановити ширину конвеєрної стрічки, діаметр подавального валка та його частоту обертання.

Як показано на рис. 2.2b, виконується наступна умова: [14];

$$\begin{aligned} Q &= 3600 \eta B H_2 V_a k_a \\ H_1 - H_2 &= R_a (1 - \cos \alpha) \\ n_a &\geq \frac{30 V_a}{\pi R_a} \end{aligned} \quad (2.4)$$

де

Q - продуктивність, кг/год;

η - коефіцієнт заповнення матеріалом, встановлений на рівні 0,2 [14];

V_a - швидкість подачі, м/с;

k_a - щільність змішаних решток, т/м³;

B - ширина конвеєрної стрічки, мм;

H_1 - висота решток перед подачею, мм;

H_2 - висота решток після подачі, мм;

R_a - радіус подавального вальця, мм;

n_a - частота обертання подавального вальця, об/хв.

Припускаючи, що висота решток перед подачею (H_1) становить 230 мм, а після подачі (H_2) - 80 мм, радіус подавального вальця (R_a) розраховується за рівнянням (2.4) як 200 мм при довжині 800 мм.

Щоб покращити захоплення матеріалу подавальним вальцем та зменшити ризик намотування решток на вал, вздовж його кола рівномірно встановлюються прямокутні притискні пластини. Ширина конвеєрної стрічки (В) встановлена на 800 мм, що відповідає довжині подавального валця, а загальна довжина стрічки становить 3000 мм. Швидкість конвеєрної стрічки (v_p) встановлена на рівні 0,2 м/с.

Висновки до розділу 2.

Для забезпечення більш плавної подачі швидкість (v_a) зазвичай повинна бути у 3...4 рази більшою за швидкість конвеєра (v_p) [15], що відповідає швидкості подачі $v_a = 0,6...0,8$ м/с. Що становить частота обертання подавального валка (n_a) у діапазоні 28,66–38,22 об/хв. З урахуванням коливань швидкості під час приводу, діапазон швидкості подавального вальця розширюється, і n_a встановлюється на рівні 25...40 об/хв.

Дослідження показують, що середня насипна щільність змішаних решток (κ_a) становить 0,024 т/м³, а теоретична продуктивність подрібнення розрахована як 663,5 кг/год, що відповідає проектній 600 кг/год.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ МОДЕЛІ НОЖОВОГО РОЛЕРА

3.1. Показники роторного ніжового ролера подрібнення решток

Конструкцію роторного ніжового механізму подрібнення показано на рис. 3.1. Він складається з приводного двигуна, датчика крутного моменту, роторного ніжового подрібнювача, нерухомих ножів, механізму регулювання зазору, ситової решітки та рами. Нерухомі ножі встановлені з обох боків ролера, а сито розташоване під ним.

Роторний ніжовий подрібнювач містить приводний вал, плиту з протиножами та рухомі ножі. У серійних роторних подрібнювачах, пустотілий приводний вал і ненахилені рухомі ножі встановлено паралельно, що дозволяє довгим пожнивним решткам намотуватися на вал, що збільшує опір різанню та знижує стійкість роботи машини.

Щоб усунути ці проблеми та покращити ефективність подрібнення, в конструкції застосовано рухомі ножі, розташовані вздовж вала у трисекційній шевронній схемі, інтегровані в єдину систему ножовою плитою, що усуває проміжки, де могла б застрягати залишки стебл.

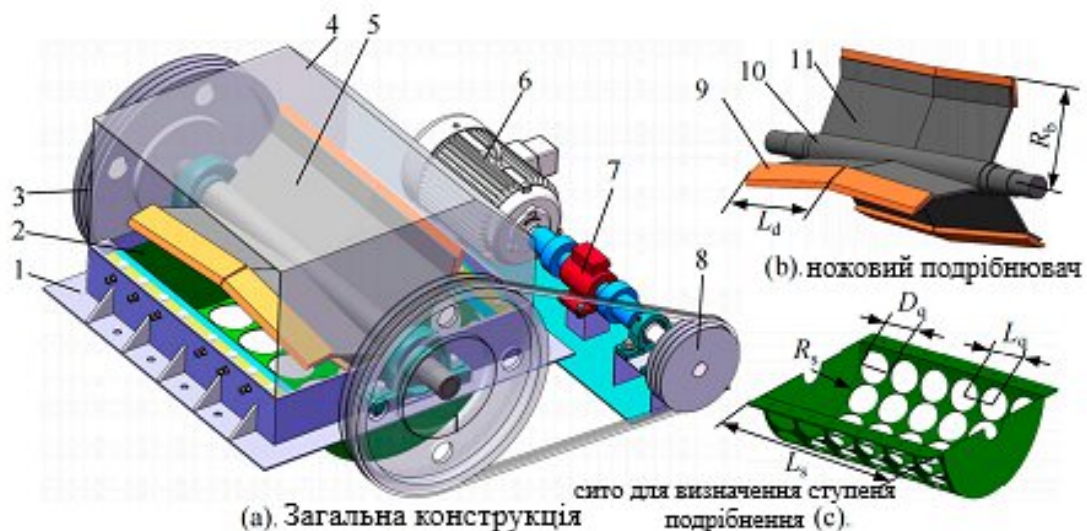


Рис. 3.1. Схема моделі конструкції механізму ролера
(а) Загальна конструкція; (б) роторний ножовий подрібнювач; (с) сито.

1- рама; 2 - сито; 3- балансувальне колесо; 4 - нерухомий ніж; 5 - роторний ножовий подрібнювач; 6 – двигун; 7 - датчик крутного моменту; 8 - комплект приводних шківів; 9- рухомий ніж; 10 - приводний вал; 11 - ножова плита

3.2. Конфігурація та конструктивні параметри рухомих ножів

Конфігурація рухомих ножів на роторному ножовому подрібнювачі впливає на їхню ефективність різання з ковзанням, що, у свою чергу, визначає продуктивність подрібнення та енергоощадність під час обробки змішаних залишків [16].

Ріжучу крайку рухомих ножів можна апроксимувати відрізком еліптичної кривої. Цей еліпс утворюється внаслідок перетину нижньої поверхні рухомого ножа та осьової лінії барабана, які нахилені під певним кутом. Криву ріжучої крайки обирають із тієї частини еліпса, що є найближчою до прямої лінії, що забезпечує рух вістря рухомого ножа (точка MN) по циліндричній траєкторії. Крива ріжучої крайки рухомого ножа показана на рис. 3.2..

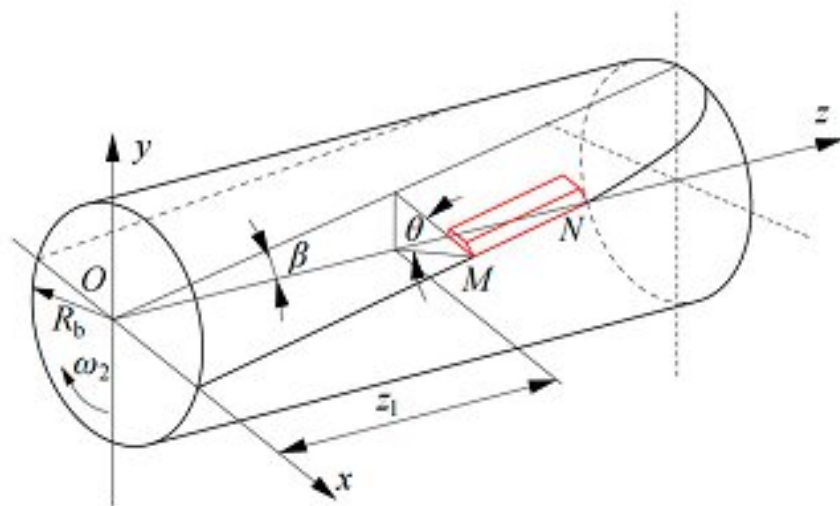


Рис. 3.2. Крива ріжучої крайки рухомого ножа ротора ролера

За умови, що піввісь великої осі еліптичної кривої дорівнює $R_b/\sin\beta$, а піввісь малої осі - R_b , рівняння руху ріжучої крайки ножа у координатній системі $хоz$, уде мати наступний вигляд: [16]

$$\frac{X^2}{R_b^2} + \frac{Y^2}{R_b^2 \sin^2 \beta} = 1, \quad (3.1)$$

Як показано на рис. 3.3., кут установлення рухомого ножа θ визначається за формулою:

$$\begin{cases} X = R_b \cos \theta \\ Z \tan \beta = R_b \sin \theta \end{cases}, \quad (3.2)$$

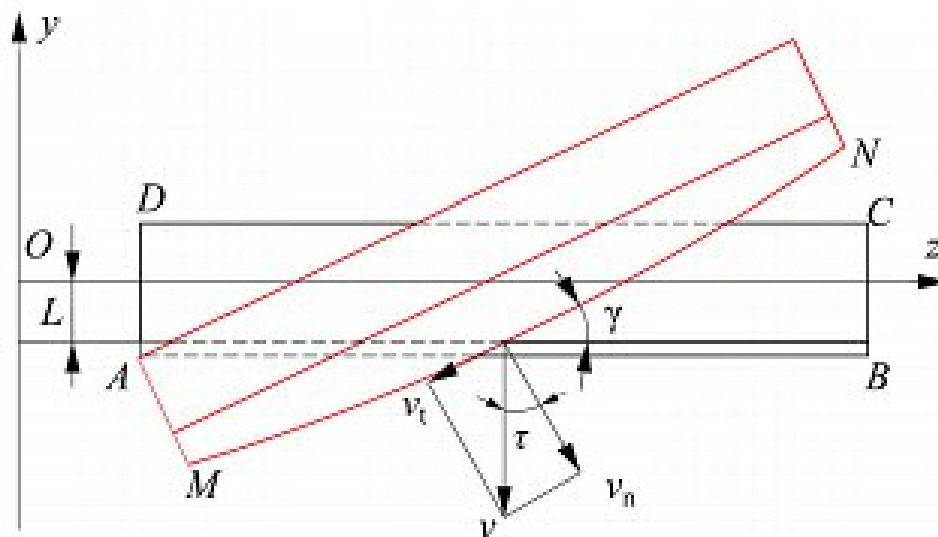


Рис. 3.3. Схематична діаграма процесу різання рухомим ножем

У рівняннях (3.1) та (3.2) X і Z позначають координати будь-якої точки на ріжучій крайці рухомого ножа, мм; β - кут нахилу еліптичної площини рухомого ножа відносно центральної площини °; R_b - радіус траєкторії руху леза, мм; θ - кут встановлення (нахилу) ріжучої крайки в точці M , °.

Виходячи із загальної робочої ширини машини та розмірів камери подрібнення, ширину подрібнювача встановлено 800 мм. Два комплекти рухомих ножів, усього шість ножів, розміщено симетрично на барабані подрібнювача ролера. Розміри кожного рухомого ножа становлять $400 \times 90 \times 15$ мм. Через малий радіус обертання подрібнювача необхідну довжину подрібнення матеріалу можна досягти лише шляхом збільшення частоти обертання. Однак підвищення частоти обертання потребує більшої жорсткості, міцності та динамічного балансування подрібнювача. Для вирішення цієї проблеми радіус обертання слід максимально збільшити в межах доступного простору камери подрібнення. Тому радіус траєкторії леза (R_b) вибрано рівним 265 мм.

Експериментальні дослідження [2,3] показують, що збільшення кута встановлення (θ) рухомих ножів зменшує кут ріжучої крайки (η), покращуючи ефективність подрібнення, але погіршуючи процес видалення. Для збалансування ефективності подрібнення та вивантаження співвідношення між кутом ріжучої кромки (η) та кутом встановлення (θ) повинна задовольнятися умові $\eta + \theta < 90^\circ$. Таким чином, обрано кут встановлення $\theta = 30^\circ$ та кут ріжучої крайки $\eta = 35^\circ$. Кут нахилу (β), обмежений конструкцією роторного подрібнювача, встановлено $\beta = 5^\circ$.

Кут різання ковзанням рухомого ножа є ключовим фактором, який впливає на опір різанню та питомі енерговитрати на процес. Оптимальний кут різання зменшує як опір різанню, так і потужність, необхідну для подрібнення змішаних поживних решток [1,2]. Під час роботи рухомий ніж рухається по коловій траєкторії навколо приводного вала. Процес різання (рис. 3.3.) починається, коли ріжуча крайка MN досягає початкової точки D змішаних решток (ABCD), і завершується, коли рухомий ніж досягає точки В. Припускаючи, що рухомий ніж MN перетинається з нерухомим ножем АВ у точці Е, швидкість V у точці Е розкладається на тангенціальну складову V_n та ковзну складову V_t . Кут між тангенціальною швидкістю V_n та швидкістю рухомого ножа V визначається як

кут різання з ковзанням (τ), а кут між поверхнями MN і АВ є кутом подачі (γ). Процес різання рухомим ножом зображено на рис. 3.3.

Як видно з рис. 3.3, кут різання з ковзанням (τ) та кут подачі (γ) пов'язані наступним рівнянням:

$$\frac{L}{\sqrt{R_b - L^2}} = \tan(\tau - \gamma), \quad (3.3)$$

де τ - кут різання з ковзанням $^\circ$,

γ - кут подачі $^\circ$,

L - висота встановлення нерухомого ножа, мм.

Як показано у рівнянні (3.3), кут подачі (γ) є прямо пропорційним куту різання (τ). Надто великий кут косоого різання призводить до надмірного збільшення кута подачі, тоді як вибір оптимального значення кута різання дозволяє знизити енергоспоживання під час подрібнення. Згідно з «Довідником із проектування сільськогосподарських машин»[10,12], кут ковзного різання повинен становити $10^\circ \dots 18^\circ$, а кут подачі - $4^\circ \dots 8^\circ$. З огляду на низький вміст вологи у пожнивних рештках в роботі обрано кут різання $\tau = 12^\circ$ та кут подачі $\gamma = 5^\circ$.

3.3. Технологічні та конструктивні параметри нерухомого ножа

Конструктивні розміри нерухомих ідентичні розмірам рухомих ножів: довжина становить 400 мм, ширина - 90 мм, товщина - 15 мм. Параметри конфігурації нерухомого ножа включає його висоту встановлення та зазор між рухомим і нерухомим ножами. Висота встановлення визначає відносне положення нерухомого ножа щодо головної осі барабана подрібнення й визначається з рівняння (3.4):

$$L = \frac{\tan(t - g) \times R_b}{\sqrt{\tan^2(t - g) + 1}} \quad (3.4)$$

де L - висота встановлення нерухомого ножа, мм.

З огляду на радіус траєкторії ріжучої крайки рухомого ножа ($R_b = 265$ мм), висоту встановлення нерухомого ножа (L) можна обчислити з рівняння (3.4), отримавши $L = 32,29$ мм. Для конструкції прийнято значення $L = 32$ мм.

Для точного регулювання зазору між рухомим і нерухомим ножами було розроблено вузол регулювання. Що складається з обмежувального болта, гайки фіксації та тримача нерухомого ножа. Контргайку закріплено на зовнішньому боці коробчастої рами, а обмежувальний болт проходить крізь гайку та з'єднується з тримачем нерухомого ножа, забезпечуючи його переміщення. Обертаючи обмежувальний болт, можна здійснювати регулювання положення нерухомого ножа, як показано на рис. 3.4.

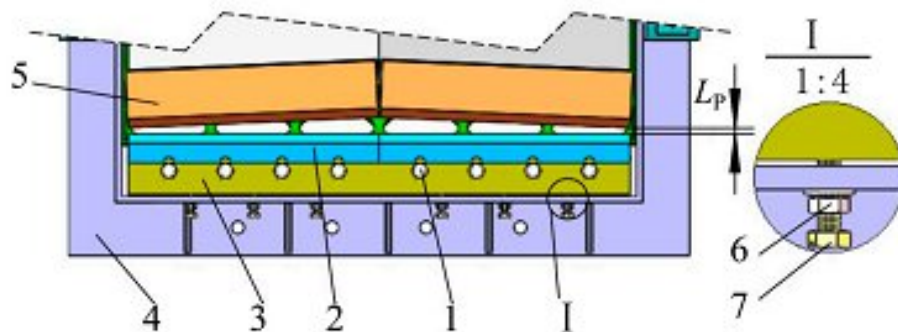


Рис. 3.4. Схематична діаграма конструкції вузла регулювання зазору між рухомим і нерухомим ножами

1 - рухомий ніж; 2 - коробчаста рама; 3 - тримач нерухомого ножа; 4 - нерухомий ніж; 5 - болт фіксації; 6 - обмежувальний болт; 7 - контргайка

Під час встановлення нерухомого ножа спочатку регулюють положення подрібнювача. Обмежувальний болт обертають для встановлення зазору між рухомим і нерухомим ножами рівним нулю. Потім обмежувальний болт обертають у протилежному напрямку, щоб відвести нерухомий ніж від рухомого,

збільшуючи зазор до досягнення необхідного значення. Після цього болт затягують для закріплення нерухомого ножа. Зазор між рухомим і нерухомим ножами (L_p) можна визначити з рівняння (3.5).

$$L_p = P' \cdot n. \quad (3.5)$$

де P - крок різьби обмежувального болта, мм;

n - кількість обертів обмежувального болта.

На основі попередніх експериментів з визначення зусилля зсуву для змішаних пожнивних залишків зазор між рухомим і нерухомим ножами (L_p) встановлюють у межах від 0,5 до 2,0 мм.

Частота обертання роторного ножового подрібнювача впливає на теоретичну довжину різання матеріалу, яка визначається як довжина подачі за проміжок часу між двома послідовними різальними діями сусідніх рухомих ножів [12]. Частота обертання (n_b) роторного ножового подрібнювача визначається за наступним рівнянням:

$$n_b = \frac{60J_a}{L_1 Z}, \quad (3.6)$$

де

V_a - швидкість подачі (в межах від 0,6 до 0,8 м/с);

L_1 - теоретична довжина різання матеріалу, мм;

Z - кількість рухомих ножів на барабані, ($Z = 3$).

3.4. Аналіз опору різанню змішаних пожнивних решток

Для кращого розуміння механізму виникнення опору різанню під час обробки змішаних пожнивних решток аналізується склад системи сил опору різанню на ріжучій крайці рухомого ножа з точки зору [15, 17].

Як показано на рис. 3.5, реактивна сила (F), що діє на рухомий ніж під час процесу зрізання решток, виражається наступним чином:

$$F = F_g \sinh + F_d \sinh, \quad (3.7)$$

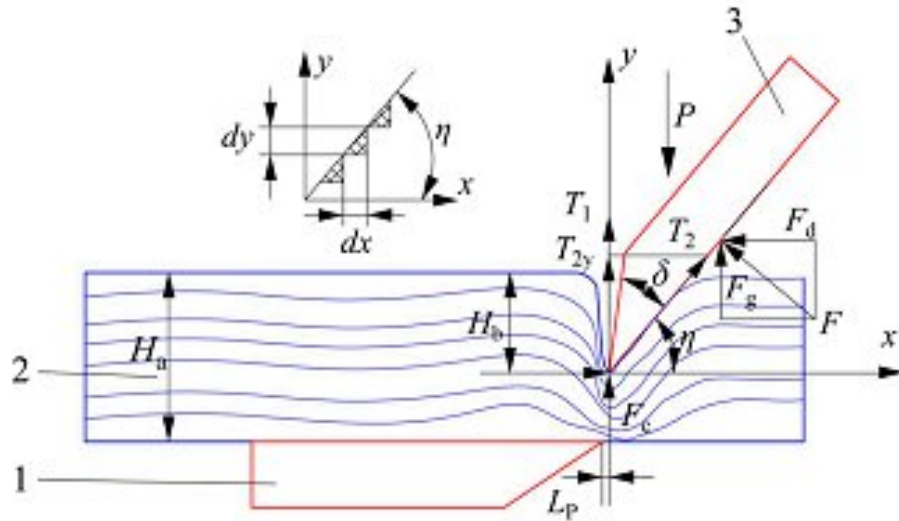


Рис 3.5. Аналіз сил під час процесу подрібнення.

1 - нерухомий ніж; 2 - змішані плівкові залишки; 3 - рухомий ніж.

Під дією реакції сили (F_c) вертикальні складові сил тертя T_1 на передній та T_2 на задній крайці рухомого ножа визначаються за формулою T_{2y} :

$$\begin{cases} T_1 = \mu F_d \\ T_{2y} = T_2 \sin \eta = \mu (F_g \cos \eta + F_d \sin \eta) \sin \eta \end{cases}, \quad (3.8)$$

Після того як пожнивні залишки стискаються та деформуються, реактивна сила (F_c), що діє на рухомий ніж, запишеться наступним чином:

$$F_c = m_d l_d \sigma_c, \quad (3.9)$$

де m_d - товщина ріжучої крайки рухомого ножа, мм;

l_d - довжина ріжучої крайки рухомого ножа, мм;

σ_c - напруження стискання пожнивних решток, МПа.

На основі наведеного аналізу можна зробити висновок, що для завершення процесу різання вертикальна сила (P), що діє на ріжучу крайку рухомого ножа, повинна задовольняти наступну умову:

$$P \geq F_c + F_g + T_1 + T_{2y}, \quad (3.10)$$

де F_c – сила реакції решток на рухомий ніж, Н;

F_g - вертикальну силу реакції, що діє на рухомий ніж від решток після стиснення, Н;

F_d – горизонтальна складова сили реакції, що діє на рухомий ніж від решток після стиснення, Н;

T_{2y} - горизонтальна складова тангенціальної сили тертя T_2 , Н.

3.5. Аналіз динамічних характеристик роботи ролерного подрібнювача

Під час нормальної роботи подрібнювач піддається значним ударним навантаженням. Якщо частота динамічного навантаження від цих ударів збігається або близька до власної частоти подрібнювача у певному режимі, може виникнути резонанс, що призводить до коливань зазору між рухомих і нерухомих ножами та потенційно спричиняє структурну втому. Це може негативно вплинути на продуктивність, ресурс та безпеку подрібнювача [8].

Для оцінки безпеки та конструктивної придатності було проведено модальний аналіз подрібнювача за допомогою програмного забезпечення ANSYS 2023R2, що дозволило визначити його власні частоти та максимальні деформації переміщення. 3D-модель подрібнювача, створена у SolidWorks 2023, була імпортована в модуль модального аналізу ANSYS.

Матеріал рухомого ножа встановлено як Сталь 65Г, а вал передачі та опорна плита виготовлені з 40ХГСА, властивості матеріалів наведені у табл. 3.1.

Для побудови сітки використовувався тип елементів SOLID93, а на обох кінцях подрібнювача застосовані нерухомі опори. Результати перших шести режимів вібрацій наведені у табл. 3.2 та на рис. 3.6.

Таблиця 3.1.

Параметри матеріалів

Параметри	Сталь65Г	40ХГСА
Густина ($\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$)	7830	7850
Модуль пружності (МПа)	$1,97 \times 10^5$	$2,1 \times 10^5$
Модуль зсуву (МПа)	$7,86 \times 10^4$	$8,0 \times 10^4$
Коефіцієнт Пуассона	0,3	0,3
Межа міцності при розтягу (МПа)	735	375
Межа плинності (МПа)	430	235

Таблиця 3.2.

Результати аналізу перших шести форм подрібнювача

Порядок	Власна частота (Гц)	Максимальна деформація (мм)
1	112,54	0,885
2	122,55	0,835
3	140,25	0,632
4	184,01	0,878
5	186,64	1,126
6	186,65	1,237

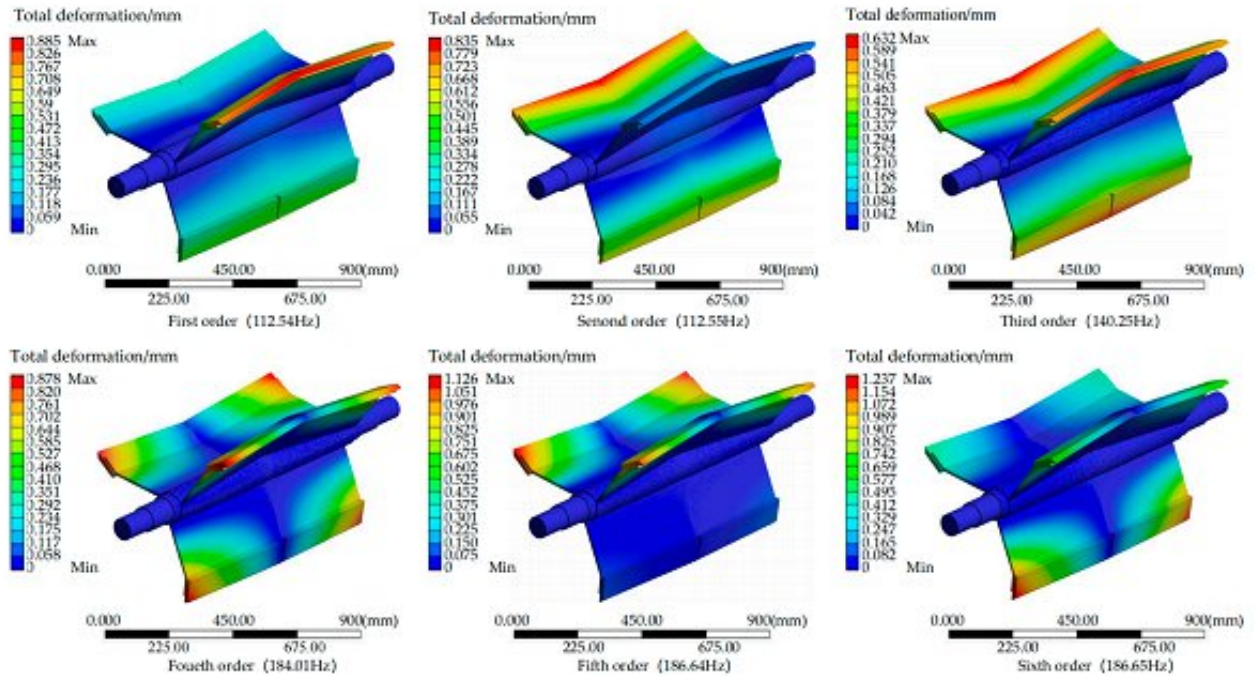


Рис. 3.6. Діаграми форм коливань роторного подрібнювача ролера за результатами модельного аналізу

Ножовий ролер Dal-Bo Maxi Cut призначений для обробки пожнивних і різних типів рослинних решток. Ролер MaxiCut можна використовувати для високошвидкісної низьковитратної обробки полів, де вирощувався соняшник, кукурудза, ріпак, зернові культури, овочеві культури, подрібнення сидератних трав тощо. Рослинні залишки ріжуться, подрібнюються, плющуються і залишаються на поверхні ґрунту. Їхній контакт із ґрунтом активує діяльність мікроорганізмів (рис. 3.7.).



Рис. 3.7. Робота агрегату на різних агрофонах та вид поверхні після обробітку

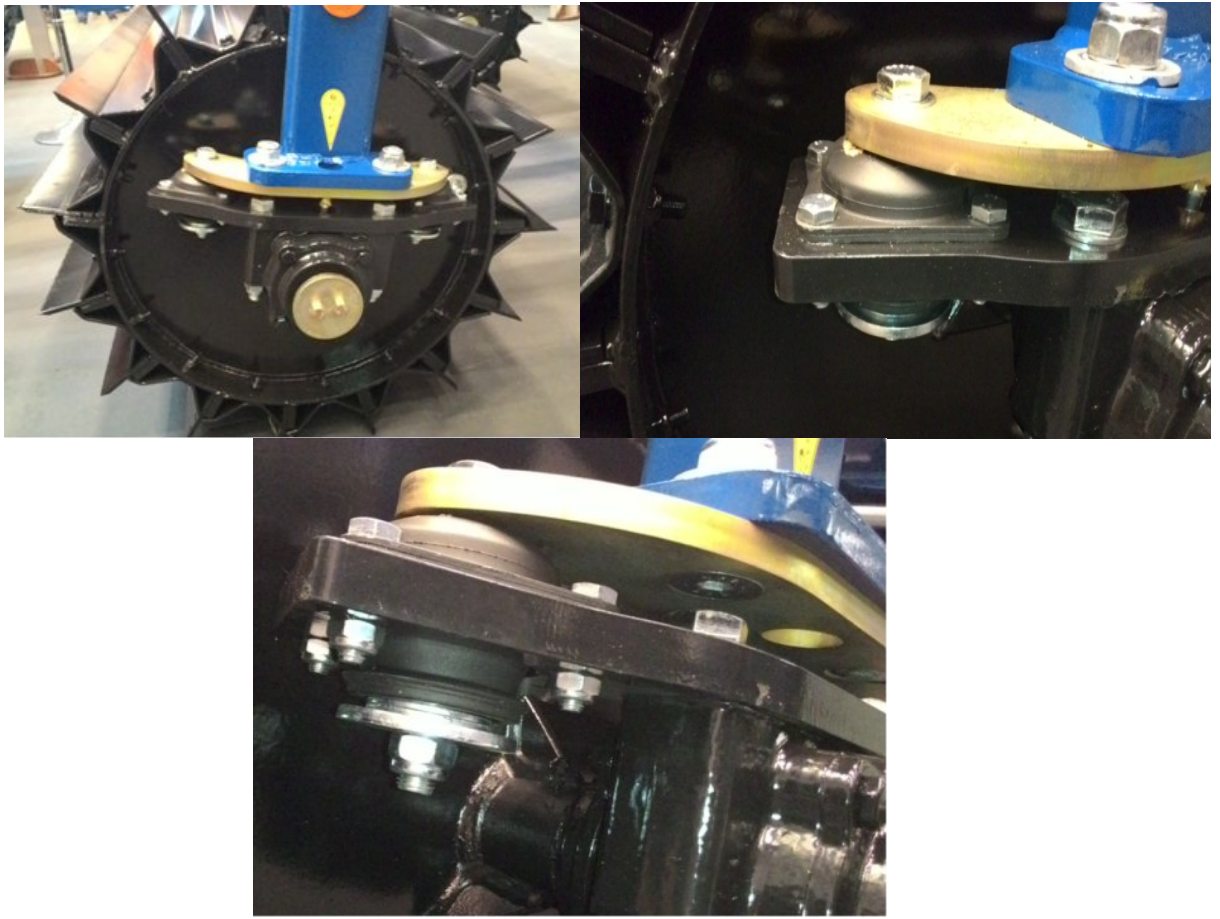


Рис. 3.8. Система запобігання вібрації з демпферною подушкою, яка встановлена між сталевими стінками

Висновки до розділу 3.

Обґрунтовано новий метод подрібнення змішаних поживних решток, заснований на принципі «однобічного різання + різання ковзанням», що дозволяє враховувати потреби в ресурсощадних технологічних процесів подрібнення рослинних решток. Було спроектовано роторний ножовий подрібнювач ролера та визначено оптимальні технологічні параметри пристрою, подачі та подрібнення.

Встановлено ключові параметри конструкції подрібнювача: швидкість подачі 25...40 об/хв, швидкість ротора-подрібнювача 120...320 об/хв та зазор між рухомими та нерухомими ножами становить 0,5...2,0 мм. Аналіз динамічних

характеристик подрібнювача за допомогою ПЗ ANSYS показав, що перші шість власних частот коливалися від 112,54 до 186,65 Гц, а максимальні деформації — від 0,885 до 1,237 мм. Частота збудження подрібнювача знаходилася в діапазоні 2...5,33 Гц, що значно нижче його першої власної частоти, та запобігає резонансу та забезпечує надійність і стійкість роботи роторів подрібнювача.

Було проведено його випробування. Застосовано ножовий ролер фірми Dal-Bo Maxi Cut з ортогональною ротацією, швидкістю подрібнювача та зазором між рухомими і нерухомими ножами, а також показники: коефіцієнт придатності довжини подрібнення стебел, коефіцієнт придатності довжини подрібнення решток та питомі енергетичні витрати.: швидкість ролика подавача 32 об/хв, швидкість подрібнювача 222 об/хв та зазор між рухомими і нерухомими ножами 0,99 мм.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведені дослідження підтвердили наявність чіткої тенденції до оптимізації конструкції ножових ролерів, зокрема геометрії лез, кута їх встановлення та використання гвинтових форм, що сприяє підвищенню надійності роботи подрібнювачів та зменшенню забивань матеріалом. Встановлено, що технологічні режими роботи агрегату, зокрема швидкість подачі, швидкість обертання барабана та зазори між ножами, мають критичний вплив на якість подрібнення, витрати енергії та стабільність роботи подрібнювача.
2. Оптимізація подачі матеріалу забезпечується за допомогою подавального валка з рівномірно встановленими притискними пластинами, а співвідношення швидкостей конвеєра та валка ($v_a \approx 3...4 v_p$) дозволяє зменшити ризик намотування решток та покращити плавність подачі.
3. Встановлені ключові параметри подрібнювача ролера: швидкість подачі 25...40 об/хв, швидкість ротора 120...320 об/хв та зазор між рухомими і нерухомими ножами 0,5...2,0 мм, що забезпечують оптимальні умови подрібнення при продуктивності до 663,5 кг/год, близькій до проектної.
4. Аналіз динамічних характеристик подрібнювача за допомогою ПЗ ANSYS показав, що перші власні частоти агрегату значно перевищують частоту збудження (112,54...186,65 Гц проти 2...5,33 Гц), що виключає резонанс та гарантує стабільність роботи роторів.
5. Проведені дослідження з ножовим ролером Dal-Bo Maxi Cut показали, що оптимальні параметри роботи: швидкість ролика подавача 32 об/хв, швидкість подрібнювача 222 об/хв та зазор 0,99 мм забезпечують високу придатність довжини подрібнення стебел і решток при мінімальних питомих енергетичних витратах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сало В. М. Вплив параметрів барабана для подрібнення рослинних решток на надійність протікання технологічного процесу / В. М. Сало, С. М. Лещенко, Д. В. Богатирьов // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. Кропивницький : ЦНТУ, 2021. Вип. 51. С. 70-77.
2. Сало, В. М. Щодо надійності технологічного процесу подрібнення пожнивних решток / В. М. Сало, Д. В. Богатирьов, С. М. Лещенко // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. Кропивницький : ЦНТУ, 2023. Вип. 53. С. 93-101.
3. Філіп'єв, М. С. Удосконалення приводу ножів подрібнювача рослинних решток : кваліфікаційна магістерська робота : спец. 133 «Галузеве машинобудування» / наук. кер. Д. В. Богатирьов ; Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. Кропивницький: ЦНТУ, 2024. –79 с.
4. XXI-й Міжнародний форум молоді "МОЛОДЬ І ІНДУСТРІЯ 4.0 В XXI СТОЛІТТІ". Збірка матеріалів форуму. Харків: ДБТУ. 2025. 530с.
5. Халізов, Д. С. Удосконалення подрібнювачів рослинних решток з обґрунтуванням параметрів ножів : кваліфікаційна бакалаврська робота : спец. 133 «Галузеве машинобудування» / наук. кер. Д. В. Богатирьов ; Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. Кропивницький : ЦНТУ, 2020. 73 с.
6. Pylypaka, S., Hropost, V., Nesvidomin, V., Volina, T., Kalenyk, M., Volokha, M., Zalevska, O., Shuliak, I., Dieniezhnikov, S., & Motsak, S. (2024). Designing a helical knife for a shredding drum using a sweep surface. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(1 (130)), 37–44. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.308195>
7. <https://doi.org/10.3390/agriculture15131370>

8. https://www.researchgate.net/publication/43261907_Reducing_vibration_while_maintaining_efficacy_of_rollers_to_terminate_cover_crops.
9. Довідник з машиновикористання в землеробстві / За ред. В. І Пастухова. – Харків: “Промпроект” 2005, 347с.
10. Наукові основи сучасних систем вітчизняного землеробства / І.Д. Примака, І.В. Мартинюк, Ю.В. Федорук, Л.В. та ін.; за ред. І.Д. Примака Вінниця: «ТВОРИ», 2022. 320 с.
11. Математичне моделювання процесів і систем : методичні рекомендації до виконання практичних робіт для здобувачів ступеня вищої освіти магістр спеціальності 208 "Агроінженерія" освітньо-наукова програма "Агроінженерія"
12. Бучинський М.Я., Горик О.В., Чернявський А.М., Яхін С.В. ОСНОВИ ТВОРЕННЯ МАШИН / [За редакцією О.В. Горика, доктора технічних наук, професора, заслуженого працівника народної освіти України]. Харків : Вид-во «НТМТ», 2017. 448 с.
13. Кірчук Р.В., Дударєв І.М. Математичне моделювання машин : навч. посібник. Луцьк : Ред.-вид. відділ Луцького НТУ, 2014. 134 с.
14. Самсонов В.В., Сільвестров А.М., Тачиніна О.М. Методологія наукових досліджень та приклади її використання : навч. посібник. К. : НУХТ, 2022. 385 с.
- Пальчевський Б.О. Дослідження технологічних систем (моделювання, проектування, оптимізація) : навч. посібник. Львів: Світ, 2001.
15. [Dave Kanicki](#), [Tom Evans](#) Disc Chisels vs. Hybrid Disc Chisels: There is a Difference, [Farm Equipment](#), 2017. Posted in [Best Practices](#).
16. Гуков, Я. С. Обробіток ґрунту / Я. С. Гуков // Технологія та техніка. Київ, 148 Нора-Прінт. 1999. - 275 с.
17. Кушнар'юв А.С. Механіко-технологічні основи обробітку ґрунту / А.С. Кушнар'юв, В.І. Кочів. Київ: Урожай, 1989. 144 с.

18. Qian, J.; Ma, S.; Xu, Y.; Li, W.; Huo, P.; Li, W. Проектування та випробування комбінованого ножа для основи цукрової тростини з ковзаючим зсувом. *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.* 2023, 39, 37–47. [CrossRef]