

Луцький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет аграрних технологій та екології

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра аграрної інженерії ім. проф. Г.А.Хайліса

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

## ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи

магістра

на тему: «Дослідження ефективності заготівлі сінажу з обґрунтуванням математичної моделі аналізу процесу»

Виконав: студент 2 курсу, групи АІм-21  
спеціальності 208 Агроінженерія  
за освітньо-професійною програмою  
«Агроінженерія»

Трохимчук П.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник Кірчук Р.В.

(прізвище та ініціали)

Гарант ОП Сацюк В.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Дударєв І.М.

(прізвище та ініціали)

Луцьк 2023



## 5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

	к-сть листів
1. Вихідні дані	1 лист
2. Огляд технічних заходів для заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку	1 лист
3. Теоретичні положення	2 листа
4. Результати експериментальних досліджень	2 листа
5. Принципова схема рулонного прес-підбирача	1 лист

## 6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Юхимчук С.Ф., доцент		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури за темою, формування завдань досліджень	15.06. – 01.07.2023 р.	
2	Обґрунтування конструкції і теоретичні дослідження	22.08 – 31.08.2023 р.	
3	Розробка схеми експериментальної установки чи досліджуваної машини	01.09 – 30.09.2023 р.	
4	Розробка програми і методики експериментальних досліджень	01.10 – 15.10.2023 р.	
5	Реалізація та обробка результатів експериментальних досліджень	01.10 – 15.10.2023 р.	
6	Експериментальні дослідження з використанням математичного методу планування	15.10 – 01.11.2023 р.	
7	Розробка креслення розроблюваного чи удосконаленого вузла	01.11 – 15.11.2023 р.	
8	Узагальнення результатів та оформлення пояснювальної записки	15.11 – 25.11.2023 р.	
9	Оформлення ілюстративного матеріалу для захисту магістерської роботи	15.11 – 25.11.2023 р.	
10	Нормоконтроль	до 09.12.2023 р.	
11	Представлення кваліфікаційної роботи на перевірку на плагіат	09.12.– 19.12.2023 р.	

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Трохимчук П.В.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Кірчук Р.В.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Гарант ОПШ

\_\_\_\_\_ (підпис)

Сацюк В.В.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

У кваліфікаційній магістерській роботі на тему: «Дослідження ефективності заготівлі сінажу з обґрунтуванням математичної моделі аналізу процесу» представлено вирішення науково-прикладної задачі формування сінажу, що запаковані у рулони, які використовуються у кормо виробництві.

Сферою застосування даного дослідження може бути кормо виробництво у тваринництві. Застосування запропонованої технології дозволить більш ефективно використовувати обладнання для приготування кормів у тваринництві, зокрема сінажу.

Кваліфікаційна магістерська робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 13 назв та 2 додатків. Основна частина викладена на 66 сторінках, містить 19 рисунків і фотографій, 1 таблицю.

## ABSTRACT

The qualifying master's thesis on the topic: "Investigation of the effectiveness of hay harvesting with the justification of the mathematical model of the process analysis" presents the solution of the scientific and applied problem of the formation of hay, packed in rolls, which are used in fodder production.

The field of application of this research can be fodder production in animal husbandry. The application of the proposed technology will allow more efficient use of equipment for the preparation of fodder in animal husbandry, in particular, hay.

The qualifying master's thesis consists of an introduction, four chapters, conclusions, a list of used sources from 13 titles and 2 appendices. The main part is laid out on 66 pages, contains 19 drawings and photos, 1 table.

## ВСТУП

Зміцнення продовольчої безпеки країни неможливе без ефективного розвитку галузі тваринництва. Неодмінною умовою ведення ефективного тваринництва є наявність надійної та якісної кормової бази. Актуальність цієї проблеми відображена у низці державних документів, де поставлено завдання виробництва високоякісних кормів з допомогою впровадження сучасних конкурентоспроможних технологій. Однією з таких технологій є заготівля сінажу в рулонах, упакованих у плівку, що дозволяє за рахунок швидкого та рівномірного пров'ялювання скошених трав, щільного пресування їх у рулони та надійної герметизації отримати якісний корм із мінімальними втратами.

Для реалізації потенційних можливостей цієї технології потрібна адаптація її до конкретних виробничих умов. Тому питання обґрунтування раціональної структури кормозбирального процесу та комплексу машин з урахуванням змінних технологічних властивостей, поживної цінності трав'яної маси та впливу метеорологічних факторів у типових регіональних умовах, спрямованих на підвищення ефективності процесу заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку, представляють науковий та практичний інтерес, а тема магістерської роботи є актуальною.

**Актуальність дослідження.** Технологія заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку, широко використовується у світі протягом останніх трьох десятиліть. Вона добре зарекомендувала себе в різних регіонах країни. Вченими та практиками розроблено структуру процесу та можливий набір технологічних операцій, проведено дослідження з зміни фізіологічних і фізико-механічних властивостей трав, що забираються, розглянуто питання ефективності впливу робочих органів на динаміку сушіння скошених трав та якість майбутнього корму.

Вченими досліджувалися зміни властивостей оброблюваного матеріалу, вплив окремих операцій на якість корму, вплив корму на продуктивність тварин та собівартість продукції тваринництва. Недостатньо вивчено закономірності самонагрівання сінажу різної вологості та щільності в рулонах після їх формування.

Вимагають наукового обґрунтування методика підбору та організації взаємодії основних машин кормозбирального комплексу на заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку, – прес-підбирачів, транспортувальників і пакувальників рулонів у плівку – з урахуванням змінних властивостей сінажу в рулонах і технологічних розривів, що допускаються між технологічними операціями.

**Мета роботи** – підвищення ефективності технологічного процесу заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку, за рахунок обґрунтування раціональних параметрів агрегатів і машин, з урахуванням властивостей оброблюваного матеріалу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- 1) виявити фактори, що впливають на ефективність кормозбирального процесу, та на їх основі розробити схему механізованого процесу заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку;
- 2) обґрунтувати раціональні схеми руху навантажувачів та транспортувальників рулонів з метою досягнення їх максимальної продуктивності;
- 3) теоретично обґрунтувати та виконати моделювання технологічного процесу заготівлі сінажу в рулонах, що упаковані у плівку;
- 4) визначити статистичні характеристики основних експлуатаційно-технологічних параметрів кормозбиральних, вантажно-транспортних машин та пакувальників рулонів;
- 5) дати оцінку результатів досліджень та розробити практичні рекомендації щодо вибору раціонального комплексу машин для заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку.

**Об'єкт досліджень** - технологічний процес заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку.

**Предмет дослідження** – закономірності процесів формування, навантаження, транспортування та пакування рулонів сінажу з урахуванням технологічних властивостей трав'яної маси та природно-господарських факторів.

**Методи та способи вирішення задачі.** Об'єкт дослідження вивчали на основі системного підходу з використанням класичного та системного аналізу, методів моделювання, теорії ймовірностей та математичної статистики. Експериментальні

дослідження виконані в лабораторних та виробничих умов. Проведено натурні досліди та обчислювальні експерименти. Результати експериментів опрацьовані з використанням методів теорії ймовірностей, математичної статистики та програмного пакету статистичного аналізу Statistica.

#### **Наукова новизна одержаних результатів.**

- вдосконалено модель механізованого процесу заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку;

- запропонована залежність розподілу рулонів сінажу по полю від його довжини, врожайності трав, параметрів валка та рулону, та обґрунтування раціональних схем рухи по полю навантажувачів рулонів для досягнення максимальної продуктивності;

- вперше запропоновано закономірність динаміки самонагрівання сінажу у рулоні;

- встановлено допустимі технологічні розриви у часі між формуванням рулону сінажу та його упаковкою при різній вологості та щільності корму, що виключають самонагрівання трав'яної маси вище за допустимі температури.

**Практичне значення одержаних результатів.** Запропоновані результати досліджень можуть бути використані при вдосконаленні обладнання формування кормів у фермерських господарствах та агрогосподарствах.

**Апробація роботи.** Основні положення виконаних досліджень обговорювались на III студентській конференції «Сучасні технології у агровиробництві та природокористуванні» факультету аграрних технологій та екології Луцького національного технічного університету (2023р.).

**Структура й обсяг роботи.** Кваліфікаційна магістерська робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 13 назв та 2 додатків. Основна частина викладена на 66 сторінках, містить 19 рисунків, 1 таблицю.

## **РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ**

1.1. Технологічні особливості заготівлі сінажу в рулонах, що запаковані у плівку

Незважаючи на те, що сінаж є найбільш фізіологічним з усіх об'ємних кормів, частка його в обсязі кормів, що заготовлюються невелика. Пояснюється це тим, що сінаж вимагає більш точного, скрупульозного дотримання технології порівняно з іншими об'ємними кормами. Однак на практиці це часто не виконується, внаслідок чого виникають значні кількісні та якісні втрати. За дотримання всіх технологічних вимог механічні та біологічні втрати корму повинні становити не більше 18...20%. Але реальні втрати значно вищі і сягають 30...40 % від урожаю трав [1,2]. Такі результати обумовлені низькою надійністю традиційної технології заготівлі сінажу у траншеях. Якісний корм при використанні такої технології можна отримати лише за дотримання жорстких технологічних вимог:

- вологість закладеної на зберігання подрібненої трав'яної маси повинна витримуватись у вузькому діапазоні (45...55 %);
- потрібна ретельна підготовка стінок і дна траншеї, щоб виключити втрати корму виділеним соком та від забруднення;
- необхідно витримувати оптимальну довжину різання листостеблового маси та використовувати потужні машини-трамбувальники корму, що забезпечують високу щільність сінажу в траншеї – 500...600 кг/м<sup>3</sup>;
- траншею необхідно заповнити та укрити в стислий термін (від 2 до 4 діб) (залежно від ємності сховища), що не вдається, у тому числі і за погодними умовами;
- потрібна якісна герметизація маси в траншеї.

Виконувати перелічені технологічні вимоги в реальних виробничих умовах важко, а навіть незначне відхилення від них призводить до зниження якості корму та ступеня його поїдання тваринами. До значних втрат якості корму призводить і тривале згодовування сінажу з траншеї після розгерметизації, особливо при заборі маси грейферними навантажувачами.

У зв'язку з цим актуальна проблема впровадження та адаптації до конкретних умов надійної технології заготівлі якісного сінажу з мінімальними втратами корму при заготівлі, зберіганні та роздачі тваринам. Такою технологією є заготівля сінажу в рулонах, упакованих у плівку. За рахунок рівномірного пров'ялювання всіх частин рослин, скорочення періоду перебування трав'яної маси в полі від скошування до

формування рулонів, високого ступеня ущільнення маси в рулонах, швидкої та якісної герметизації корму втрати сухої речовини, обмінної енергії та каротину знижуються за рулонної технології сінажування в 1,5...2,0 рази порівняно з традиційною траншейною технологією [2,3].

Особливості технології заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку, полягають у наступному [2,3]:

- скошування трав здійснюється з одночасним плющенням, що дозволяє значно зменшити загальні польові втрати поживних речовин, а також скоротити час знаходження зеленої маси на відкритому повітрі, знижуючи ризик впливу несприятливої погоди;

- збирання трав здійснюється в оптимальній фазі їх фізіологічного розвитку: бобові - фазі бутонізації - початку цвітіння; злакові – на початку колосіння; злаково-бобові - у фазі бутонізації бобових компонентів травосуміші;

- обов'язково використовуються розпушування та зворушення скошеної трави, які формують пухкий шар трав'яної маси у прокосі, значно скорочують терміни її пров'ялювання у полі до вологості 55...60 % (з 10-12 годин до 4-6 годин) та зменшують біохімічні втрати сухої речовини;

- формуються валки граблями-валкоутворювачами, які згрібають і ворують трав'яну масу з утворенням пухких, швидковисихаючих валків, у поперечному перерізі близьких до прямокутної форми, створюючи тим самим умови для одержання рівних рулонів;

- формування валків починають при вологості трав'яної маси 55 ... 60%, а при низькій урожайності трав та невеликій ширині захоплення граблів валки здвоюють для підвищення продуктивності роботи прес-підбирачів;

- підбирають трави з валків та пресують у рулони високої щільності (до 400...450 кг/м<sup>3</sup>) та правильної форми при вологості трав'яної маси 45...60 %;

- навантаження та перевезення рулонів сінажу здійснюються відразу після їх формування, а розвантаження рулонів виконується акуратно, без пошкодження та порушення їх форми, забезпечуючи цим умови для якісної, рівномірної упаковки корму в плівку;

- упаковка рулонів сінажу в поліетиленову плівку проводиться протягом кілька годин після формування рулонів, щоб уникнути самонагрівання маси до температури понад 37...38°C, що призводить до втрат протеїну, каротину та вітамінів та погіршення поїдання та засвоєння корму тваринами;

- укладають обгорнуті рулони сінажу на зберігання в сараї, під навіси або просто неба на підготовленому кормовому майданчику.

Виконання перерахованих технологічних вимог дозволяє протягом доби виконати весь комплекс робіт від скошування трав до упаковки та укладання корму для зберігання.

При швидкій герметизації корму запобігається виникнення цвілі та гнилі, активніше розвиваються молочні бактерії. Швидка упаковка запобігає зігріванню маси, сприяє збереженню цукру, протеїну, вітамінів, прискорює початок консервації. Оптимальна кількість шарів плівки – шість. Кожен наступний шар перекриває попередній на 50%. При нормальному технічному стані та правильному регулюванні обмотувача розтяг плівки становить 55...70 %, щоб забезпечити більш щільну обмотку рулону, краще виділення клею та склеювання шарів плівки. Ретельна герметизація рулонів пакувальником дозволяє зберігати їх на підготовленому відкритому майданчику протягом 2 років без суттєвого погіршення якості корму.

Поштучний паркан та розгерметизація рулонів при роздачі корму тваринам запобігають окисленню та вторинній ферментації сінажу, що мають місце при заборі сінажу з кормового масиву у траншеї.

Для підвищення ефективності процесу заготівлі сінажу в упаковці, зниження собівартості та підвищення якості корму необхідно проведення досліджень з обґрунтування раціонального якісного та кількісного складу кормозбирального комплексу; встановити закономірності взаємодії окремих агрегатів та ланок комплексу з урахуванням швидкості пров'ялювання скошених трав у полі; визначити закономірності самонагрівання сінажу в рулонах та обґрунтувати допустимі розриви в часі між пресуванням корму та подальшою його упаковкою.

## 1.2. Огляд технічних засобів для заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку

У системі заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку, для всіх технологічних варіантів можна виділити 4 основні підсистеми: скошування та польове сушіння трав; підбір трав з одночасним пресуванням; навантаження-транспортування-розвантаження рулонів; упаковка рулонів та укладання корму на зберігання.

Підсистема скошування та польового сушіння трав може включати в різному поєднанні наступні операції: скошування трав у прокос або валок, спускування трав, згріб трав у валок, обертання валків, здвоювання валків, розкидання валків.

Скошування трав може виконуватися косарками, обладнаними ротаційним та сегментно-пальцевим різальним апаратом. В основному використовуються ротаційні косарки, що забезпечують якісне скошування високоврожайних трав, полеглих та переплутаних травостоїв на високих поступальних швидкостях. Такі косарки, на думку західних і російських експертів, мають продуктивність на 30% вищу, ніж сегментно-пальцеві зі зворотно-поступальним рухом ножів [3-5]. Найбільш популярні фірми-виробники ротаційних косарок "Kuhn", "Krone", "Claas", "Vicon-Kverneland", "Fella", "Stoll", "Kemper", "Fisher", , "Кевер" та ін .

При заготівлі високоякісних кормів із трав дуже важливо максимально зберегти найбільш цінну частину рослин – листя. Однак при вологості пров'яленої трави близько 40%, вміст вологи в листі становить лише 20% [4-6]. Тому надалі, при механічному впливі, листя легко обламуються та розсипаються, що неприпустимо.

Найбільш поширений метод, що прискорює і вирівнює процес висихання листя і стебел, - плющення трав'яної маси, що скошується. Для здійснення його використовуються косарки-плющилки, які, крім скошування травостою, розплющують, роздавлюють стебла, значно прискорюючи вологовіддачу.

Для інтенсифікації вологовіддачі скошених трав ротаційні косарки обладнають кондиціонерами динамічної дії. Вони компактніші, ніж вальцьові апарати, менш металомісткі, інтенсивніше руйнують зовнішній восковий шар рослин і формують більш пухкий, вентиляований валок. За кордоном косарки з кондиціонерами

динамічної дії роблять майже всі провідні машинобудівні фірми: "Claas", "Krone", "Case", "Kuhn", "John Deere", "Kverneland Group" та ін.

Фірмою "Fella" було створено агрегат із двох косарок-плющилок: фронтальної та задньонавісної, а фірмами "Claas" і "Krone" - агрегати, що складаються з трьох косарок-кондиціонерів, що навішуються на спеціальний енергетичний засіб. Перша найенергонасиченіша ротаційна косарка-кондиціонер була зроблена фірмою "Krone". Вона включає три косилочні модулі загальною шириною захоплення 9,1 м і спеціальний енергозасіб потужністю 300 к.с. (221 кВт). Цією ж фірмою була розроблена самохідна косарка "Big M" з максимальною шириною захоплення 13,2 м і продуктивністю до 20 га/год за рахунок комбінування трьох косарок – однієї переднавісної та двох задньонавісних на базі самохідного шасі.

Наступними після скошування операціями при заготівлі пресованих кормів є операції, що забезпечують інтенсифікацію процесу польової сушіння скошених трав – зворушення, згрібання, обертання, а за потреби – розкидання пров'яленої трав'яної маси з валків. Крім того, при роботі на сіножаті з низькою врожайністю трав для збільшення продуктивності проводять здвоювання валків. Всі ці операції здійснюють за допомогою граблів та ворошилок, які за типом робочих органів можна класифікувати як: ротаційні, барабанні, колісно-пальцеві та конвеєрні [4-6]. За способом агрегування розрізняють причіпні, напівпричіпні та навісні граблі.

Проте, останніми роками розробники колісно-пальцевих граблів за рахунок оптимізації форми та підбору для пальців пружних та міцних матеріалів, суттєво покращили взаємодію їх з трав'яною масою та ґрунтом. Поліпшилося копіювання поверхні поля, зменшилася засміченість корму ґрунтом, збільшилася спущеність валків. Колісно-пальцеві граблі італійських виробників - фірм Tonutti (Milenium, Raptor, RCS) і Sitrex (Magnum, Sitrex RP, Sitrex HDY16) – незначно поступаються за технологічними властивостями роторним граблям, але мають набагато меншу ціну.

Машинобудівні фірми ("Stoll", "Fella", "Claas", "Kuhn", "Pottinger", "Krone" та ін.) виробляють як спеціальні машини для згрібання трав'яної маси (граблі) або її ворошення (ворошилки), так і універсальні машини, що виконують і зворушення, і згрібання.

Пресування стеблових кормів є найбільш прогресивною та раціональною технологією для створення міцної кормової бази [4-6]. Для здійснення технології пресування провідні зарубіжні та вітчизняні фірми виробляють різноманітні моделі прес-підбирачів, які в залежності від форми спресованого матеріалу поділяються на поршневі, що формують прямокутні пакунки та рулонні, що утворюють рулони циліндричної форми.

З існуючих технологій заготівлі пресованих кормів рулонна технологія займає у світовій практиці домінуюче становище (до 80% продаж машин для підбору валків) [4-6]. Це пояснюється рядом переваг рулонних пресів у порівнянні з прес-підбирачами, які формують прямокутні тюки та іншою пресувальною технікою:

- рулонна технологія продуктивніша за технологію пресування трав'яної маси прямокутні тюки в 1,5 ... 2,0 рази;
- заготівля стеблових кормів у рулонах дозволяє виключити ручний працю, оскільки всі технологічні операції повністю механізовані;
- простота конструкції і набагато менша вартість у порівнянні з прес-підбирачами, що формують великогабаритні тюки.

В силу перерахованих вище переваг виробничники віддають перевагу рулонній технології. Підтвердженням цього є різноманіття рулонних прес-підбирачів, що випускаються, в конструкціях яких знайшли відображення найбільш прогресивні технічні рішення.

Усі існуючі на даному етапі рулонні прес-підбирачі можна класифікувати за такими ознаками: типу камери пресування; за розміром рулону, що формується; за режимом формування рулонів; за системою обв'язування; по наявності подрібнювального апарату [4-6].

Визначальна класифікаційна ознака рулонних прес-підбирачів - це камера пресування. Залежно від її конструкції розрізняють прес-підбирачі з камерою пресування постійного об'єму, змінного об'єму та комбінованою камерою пресування.

Робочими органами в пресувальних камерах постійного обсягу є ролики, елеваторні ланцюги, ланцюжково-планчасті транспортери тощо. У пресувальних

камерах такого типу формується рулон із пухким серцевиною та ущільненим зовнішнім шаром. Це відбувається внаслідок того, що процес формування рулону протікає у два етапи. На першому етапі пресувальна камера заповнюється матеріалом без підпресування. І лише на другому етапі в роботу включаються робочі органи камери – транспортери, що залучають матеріал до обертального руху і формують рулон.

До переваг камери постійного об'єму можна віднести високу продуктивність, надійність, простоту експлуатації, низькі витрати на технічне обслуговування та ремонт. Недоліком є наявність пухкої серцевини рулону з великим вмістом повітря, що може стати епіцентром розвитку небажаних аеробних біологічних процесів та втрати якості корми.

Донедавна прес-підбирачі з пресувальною камерою постійного обсягу займали лідируючу позицію на світовому ринку серед рулонних прес-підбирачів – понад 70 %. Однак наразі намітилася тенденція збільшення частки прес-підбирачів із пресувальною камерою змінного обсягу, відмінною особливістю яких є те, що формування рулону починається відразу ж після надходження рослинної маси пресувальну камеру. Внаслідок цього рулон, що утворився, має приблизно однакову щільність по всьому перерізу, що зрештою забезпечує кращу безпеку кормів. Робочими органами в пресувальних камерах такого типу є резинотканеві ремені, а також ролики або ланцюги з поперечними планками.

Для забезпечення рівномірного розподілу щільності по перерізу рулону фірмою "Claas" (Німеччина) було винайдено пристрій максимального тиску MPS, що використовується в моделях прес-підбирачів серії "Rollant". У моделях 300 серії використовується пристрій MPS II (рис 1.1), що забезпечує більш високу щільність пресування рулону.



Рисунок 1.1 - Пристрій максимального тиску MPS II, Claas

Усі переваги пресувальних камер постійного та змінного об'ємів були втілені у рулонних прес-підбирачах із комбінованою камерою пресування, які вперше з'явилися на початку 90-х років минулого століття.

У передній частині такої пресувальної камери на рухомому поворотному важелі розташовані вальці, які формують серцевину рулону, а потім нескінченні ремені або пруткові ланцюги формують рулон до заданого діаметра. Така конструкція забезпечує отримання рулонів з підвищеною щільністю пресування при м'якій серцевині і може застосовуватися для пресування сіна, сінажу, соломи та силосу.

Прес-підбирачі з комбінованою камерою пресування випускаються фірмами "Fiatagri" (Італія), "Riveierre Casalis" (Франція), "Grunderko" (Італія), "Pottinger" (Австрія).

За розміром рулону, що формується, прес-підбирачі поділяються на звичайні (традиційні), великогабаритні та мінігабаритні. Звичайні прес-підбирачі формують рулони діаметром 1,2...1,5 м ("Claas", "Krone", Німеччина; "New Holland", "John Deere", США; "Kverneland Group", Норвегія; та ін). Великогабаритні прес-підбирачі формують рулони діаметром 1,8...2,0 м ("Lely/Welger", Німеччина). Мінігабаритними є прес-підбирачі, що формують рулони діаметром 0,55 ... 0,63 м, довжиною 0,5 м ("CAEB", "Wolwo", Італія).

За режимом формування рулону прес-підбирачі можуть бути переривчастої та безперервної дії. Конструкція рулонних прес-підбирачів переривчастої дії передбачає їхню зупинку під час обв'язування рулону та викидання його з камери пресування.

Більш продуктивні рулонні прес-підбирачі безперервної дії, у яких обв'язування та скидання рулону відбуваються без зупинки агрегату. Особливість конструкції рулонних прес-підбирачів такого типу полягає у наявності додаткової камери попереднього пресування. Ця камера використовується для прийому трав'яної маси та її підпресування під час обв'язування рулону в основній пресувальній камері. Після скидання рулону на поле в основну камеру подається ущільнена в камері попереднього пресування маса. Потім цикл повторюється і таким чином забезпечується безперервна робота машини. Перші зразки таких рулонних прес-підбирачів було створено фірмами "Claas" і "Supertimo" (Італія), але широкого поширення на практиці вони поки не отримали через більш складну та дорогую конструкцію.

З середини 90-х років минулого століття найбільші зарубіжні машинобудівні фірми розпочали випуск прес-підбирачів, з подрібнюючими апаратами ("Claas", "Krone", "New Holland", "John Deere", "Kverneland Group" та ін.). Подрібнення трав'яної маси перед пресуванням дозволяє підвищити щільність пресування рулонів приблизно на 10%, знизити питому витрату обв'язувального матеріалу на 1 тону корму та більш раціонально використовувати транспортні засоби. Але при цьому збільшуються на 25...30% витрати палива на пресуванні та маса прес-підбирачів, значно зростає ціна машини.

Залежно від виду матеріалу для обв'язування рулонів, прес-підбирачі поділяються на три типи: з обв'язуванням шпагатом, сіткою або з одночасною обв'язкою шпагатом та сіткою. Прес-підбирачі, що використовують шпагат під час обв'язування рулонів, оснащують одинарним вузлов'язачем або подвійним. Причому час, що витрачається на обв'язування рулону одинарним вузлов'язачем становить 40 секунд, а при використанні двошпагатних в'язальних головок - близько 20 секунд, що сприяє збільшенню продуктивності прес-підбирача на 10 ... 12%.

При обв'язуванні рулону 1,5...2,5 шарами сітки час обв'язування становить 10...15 секунд. Продуктивність машин при такому способі обв'язування збільшується на 20 ... 30% [4-6]. Рулони, обгорнуті сіткою, краще зберігають форму, менше промокають при випаданні опадів. Особливо актуальне застосування обв'язувальної сітки під час використання прес-підбирачів з подрібнюючими механізмами.

Однак застосування при обв'язуванні лише рулонної сітки вимагає акуратного вивантаження рулонів з транспортного засобу, щоб виключити руйнування обв'язувального матеріалу і цілісність рулону. Слід враховувати, що питомі витрати на обв'язувальний матеріал при використанні сітки у 6...8 разів вищі, ніж за використання шпагату.

Одночасне обв'язування рулонів шпагатом і сіткою дозволяє забезпечити більш надійну обв'язку та стабільну форму рулону, але збільшує тривалість та вартість виконання цієї операції, тому комбінація сітки та шпагату при обв'язці рулону практично не використовується.

Аналіз стану та тенденцій розвитку конструкцій рулонних прес-підбирачів показує основні напрямки вдосконалення процесу пресування рулонів сінажу: зростання продуктивності машин, збільшення щільності пресування, застосування додаткових операцій та технічних засобів, що забезпечують підвищення якості кормів, що заготовлюються, і кращу їх збереження.

У технології заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку, крім прес-підбирачів, важливу роль грають обмотувачі рулонів. Відразу після пресування рулони необхідно обмотати плівкою для ізоляції їх від зовнішнього середовища, щоб уникнути самонагрівання трав'яної маси та появи цвілі.



Рисунок 1.2 – Рулонні прес-підбирачі R12 Super та RB 15/2000

Існуючі обмотувачі рулонів можна класифікувати за такими ознаками:

- а) за ступенем мобільності: стаціонарні, що працюють лише на кормовій майданчику та мобільні, що працюють на полі в агрегаті з прес-підбирачем або за ним;
- б) за принципом роботи: самостійний агрегат та комбінований агрегат (у тандемі з прес-підбирачем);
- в) за способом агрегування: причіпні та навісні;
- г) за способом завантаження рулону: з самозавантаженням та з використанням навантажувачів;
- д) за способом упаковки: індивідуальна обмотка, рядова (лінійна, групова) обмотка та укладання в полімерний рукав;
- е) за формою об'єкта, що пакується: рулонні, тюкові, універсальні.

Пристрої для пакування рулонів у плівку виробляють багато фірм: "Anderson Group", "Wolagri", "Kverneland Group", "Class", "John Deere", "New Holland", "Krone", "Kuhn", "Sipma", та інші.

Широка лінійка обмотувачів представлена на ринку машинобудівною фірмою "Sipma" (Польща): обмотувач із самозавантаженням Z-557, причіпний обмотувач OS 7535 MAJA (рис. 1.3), навісні обмотувачі Z-274 та Z-274/1 і т.д. Всі вони оснащені пристроями, що здійснюють захоплення та обрізання плівки. Завдяки цим пристроям втручання механізатора потрібно тільки при закладці нової плівки бобіни.



Рисунок 1.3 – Індивідуальний обмотувач рулонів OS 7535 MAJA

У Європі причіпні та навісні обмотувачі поступово витісняються високопродуктивними комбінованими агрегатами – обмотувачами, які працюють у тандемі з прес-підбирачами або використовуються як додаткова опція до нього. Про це можна судити за новинками, що випускаються великими машинобудівними концернами (“Claas”, “Krone”, “Kverneland Group”, “Kuhn”, “Anderson Group” та ін.). Мобільний агрегат здійснює упаковку рулону відразу після його формування, оскільки прес-підбирач скидає рулон на стіл пакувальника. Більшість європейських фермерів частіше використовують рулонні обмотувачі агрегатованого типу. У причіпному варіанті пакувальна установка з'єднується з прес-підбирачем за допомогою телескопічної тягової штанги. Після закінчення формування рулону включається програма "обмотування рулону": тягова штанга скорочується, обмотувач підтягується впритул прес-підбирачеві, і рулон перекидається на платформу обмотувача.

За рахунок поєднання функцій пресування та обмотування рулону вивільняється трактор. Корисним пристроєм у прес-підбирача Comprima фірми "Krone" є перевертач рулонів при їх розвантаженні, який автоматично укладає рулон на торцеву сторону, на якій більше шарів плівки, що дозволяє уникнути пошкодження плівки про стерню та запобігти проникненню всередину шкідників.

Цікавим є нова розробка “Kverneland Group” – прес-підбирач FastBale (рис. 1.4). На сьогоднішній день це єдиний у світі безперервно працюючий рулонний прес-

підбирач із фіксованою камерою. У На відміну від традиційних механізмів, обмотка в Kverneland FastBale відбувається у вертикальній площині. Як тільки процес обмотки завершено, обмотувач опускається, а його задній ролик піднімається, вивільняючи цим упакований рулон для опускання на землю. Така оригінальна конструкція прес-підбирача з обмотувачем робить його дуже компактним - Kverneland FastBale набагато коротше, ніж будь-який аналог, представлений сьогодні на світовому ринку.



Рисунок 1.4 – Комбінований рулонний прес-підбирач FastBale

Істотними недоліками технології упаковки рулонів сінажу в плівку тривалий час залишалися низька продуктивність індивідуальних обмотувачів і значні витрати на пакувальний матеріал через велику витрату дорогої плівки. Усунути ці недоліки дозволили розробка та Використання швидкісних рядових обмотувачів, що здійснюють групове пакування рулонів. Кожен рулон, що обмотується, до упаковки підпресовується на платформі обмотувача торцевою поверхнею до попереднього рулону і потім обмотується та укладається у загальну лінію. Швидкість обмотки одного рулону збільшується в 4...5 разів, а витрата плівки скорочується на 40% [4-6].

Основні розробники та виробники таких обмотників – фірми “Anderson Group” та “Tube-Line manufacturing” (Канада), “Frontier Equipment – Deere & Company” (США). У Росії (м. Перм) виробництво таких обмотників за ліцензією канадської

фірми “Anderson Group” здійснюють підприємство “Навігатор-НМ” – Neoliner NWX 660 (рис. 1.5), Neoliner Hybrid X та “Краснокамський РМЗ” – Speedway-120.



Рисунок 1.5 – Обмотувач рулонів Neoliner NWX 660

Основними недоліками рядових пакувальників рулонів є їх висока вартість і необхідність у кормовому майданчику великих розмірів зберігання рулонів в одношарових рядах, що не завжди доступне для фермерів та невеликі підприємства. Однак для середніх і великих підприємств застосування таких пакувальників має серйозні перспективи, завдяки високій продуктивності та меншій витраті пакувальної плівки.

Значний вплив на собівартість сінажу та продуктивність кормозбирального процесу надає правильний вибір машин та агрегатів для здійснення вантажно-розвантажувальних та транспортних робіт. Навантаження і транспортування рулонів сінажу повинно виконуватися строго відповідно до технологічних вимог – акуратно, без пошкодження рулону та порушення його форми, для забезпечення подальшої якісної упаковки корми у плівку. Крім цього, необхідна жорстка ув'язка за часом роботи прес-підбирачів, навантажувачів, транспортувальників та пакувальників рулонів щоб уникнути надмірного самонагрівання трав'яної маси в рулоні, що призводить до значного зниження якості корму, що заготовляється, і його перетравлення. Вирішити ці завдання дозволяють вантажно-транспортні засоби, що випускаються вітчизняними та зарубіжними машинобудівними фірмами.

Транспортне обслуговування процесу заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку, може здійснюватися за двома основними схемами:

- з виконанням операцій завантаження та транспортування рулонів одним комбінованим агрегатом;
- з поділом операцій навантаження та транспортування рулонів між окремими агрегатами.

За першою схемою працюють самозавантажувальні транспортувальники рулонів, а за другою – автомобільні та тракторні транспортні агрегати у поєднанні з навантажувачами періодичної дії.

З усіх транспортних засобів найбільш адаптованими за своїми технологічними властивостями до заготівлі сінажу в рулонах є транспортувальники рулонів сінажу, що самозавантажуються. Вони призначені для підбору рулонів, транспортування їх до місця упаковки та зберігання, подальшого розвантаження. Наявність у них маніпулятора для завантаження рулонів та поздовжнього транспортера на платформі дозволяє цим машинам працювати автономно і на завантаженні рулонів, і на розвантаженні. Крім цього, перевагою цих комбінованих машин є більш дбайливе розвантаження рулонів у порівнянні з самоскидними кузовами та причепами. Це сприяє кращому збереженню форми рулонів перед їх упаковкою.

Вітчизняні та зарубіжні машинобудівні фірми випускають самозавантажувальні транспортувальники рулонів, що розрізняються по: вантажопідйомності, кількості рулонів, що перевозяться, класу агрегатованого енергозасобу.

Транспортувальник рулонів TRB 10 (рис. 1.6 а) вантажопідйомністю 9 т є напівпричіпною машиною та агрегується з тракторами 1,4...2 класу. Він здатний перевозити 10 рулонів сінажу. Конструкція транспортувальника TRB-10, як і інших моделей TRB, включає підбираючий механізм, що складається із завантажувального важеля з внутрішньою та зовнішньою вилками та гідроциліндром, який дозволяє завантажувати рулони без зупинки, під'їжджаючи до них з будь-якого боку. Механізм проштовхування рулонів складається з рамки штовхача і платформи, що пересувається, допомогою якого рулони зрушуються до задньої частини платформи в міру їхнього накопичення. Вивантаження рулонів здійснюється за допомогою

платформи, що гідравлічно піднімається. Перевагою транспортувальника рулонів TRB 10 є можливість перевезення рулонів різного діаметра та довжини (діаметром) 1,2 ... 1,8 м і довжиною 1,2 ... 1,5 м).



а)

б)

Рисунок 1.6 – Самозавантажувальні транспортувальники рулонів: а) - TRB 10; б) - Buhler 2500

Транспортувальники рулонів Buhler1500, Buhler 2500 (“Buhler Industries Inc.”, Канада) вантажопідйомністю відповідно 6 т і 12,73 т (рис. 1.6 б). Максимальна кількість рулонів, що перевозяться, 8 і 15, відповідно. Транспортувальник підбирає та завантажує рулон вилковим захопленням, яке за допомогою гідроциліндра піднімає його на платформу. Потім рулон переміщається передньої стінкою. Розвантаження рулонів відбувається через задній борт методом зсуву передньої стінки, при цьому не ушкоджується форма та цілісність рулону. Перевезення рулонів сінажу також здійснюється автомобільними та тракторними транспортними агрегатами у поєднанні з навантажувачами періодичної дії, обладнаними захватами для роботи з рулонами сінажу. Автомобільні транспортні агрегати найчастіше використовують самоскидні кузови та причепи. Тракторні транспортні агрегати використовують як причепи-самоскиди, так і причепи, що вимагають додаткових навантажувачів для їх розвантаження.

Причепи поділяються: за призначенням, конструктивними ознаками, вантажопідйомністю, площею внутрішньої частини платформи та обсягом кузова. За призначенням тракторні причепи поділяються на універсальні та спеціалізовані. До універсальних причепів відносяться причепи-самоскиди та більшість причепів з

бортовими платформами. Спеціалізовані причеми призначені для перевезення певних видів вантажів, у тому числі і рулонів сіна та сінажу.

Спеціалізовані тракторні причеми-платформи для транспортування рулонів сінажу здійснюють лише їхнє перевезення. Навантаження та розвантаження рулонів здійснюється додатковими навантажувачами.

Засіб транспортний спеціальний СТС-12 та СТС-9,5 вантажопідйомністю, відповідно, 12 т і 9,5 т (рис.1.7а) призначений для перевезення рулонів сіна та сінажу різних розмірів. Агрегатується з колісними тракторами тягового класу 2...3. Площа відкритої платформи, 27,7 м<sup>2</sup>, Закритої - 16,5 м<sup>2</sup>. Причіп-рулоновоз тракторний ПРТ-8 складається з платформи, що має жорстку зварну конструкцію (рис. 1.7 б). Платформа обладнана передньою та задньою торцевою стінкою, які дозволяють перевозити рулони у два ряди. Сповзання рулонів запобігають борти. Агрегатується з тракторами 3 класи, вантажопідйомність – 8 т. Недоліком конструкції причепа ПРТ-8 є нестійким положенням верхніх, не закріплених рулонів, не що дозволяє розвивати високу швидкість.



Рисунок 1.7 – Спеціалізовані тракторні причеми для перевезення рулонів сіна та сінажу: а) - СТС 12; б) - ПРТ-8

Причіп платформа для перевезення тюків ПП-12/3. Чотири натяжні троси забезпечують фіксацію рулонів під час перевезення. Задня стінка відкидається для розвантаження пакунків. Причіп платформа шириною 2,5 м використовується для перевезення рулонів діаметром 1,2 м, а платформа з розширенням до 3 м використовується для перевезення рулонів діаметром 1,5...1,8м.

З автомобілів для перевезення рулонів найчастіше використовують прямобортні самоскиди КамАЗ-45143 та ГАЗ-САЗ-3507. Автомобіль КамАЗ-45143 – самоскид із бічним розвантаженням, вантажопідйомністю до 10 т (рис. 1.8а). Платформа металева, зварена, прямокутна форма з відкидними бічними бортами. Напрямок розвантаження – на дві сторони. Окремі модифікації КамАЗ-45143 комплектуються надставними дерев'яними чи металевими бортами. Внутрішні розміри платформи  $5,25 \times 2,32 \times 0,63$  (+0,62 з надставними бортами) м, площа платформи –  $12,2 \text{ м}^2$ . Для полегшення закривання бічних та надставних бортів платформа обладнана торсіонними помічниками. КамАЗ-45143 може працювати у складі автопоїзда із самоскидними причепами.



Рисунок 1.8 - Автомобілі-самоскиди: а) - КамАЗ-45143; б) -САЗ-35071

Автомобіль-самоскид ГАЗ-САЗ-35071 вантажопідйомністю близько 4 т, має металевий кузов з відкидними бічними та заднім бортами (рис.1.8 б). Напрямок розвантаження – на три сторони. Платформа металева, зварна, прямокутної форми, окремі модифікації можуть обладнатися додатковим обладнанням - надставними бортами, помічниками бортів, ущільнювачами бортів, тентом. Внутрішні розміри платформи  $3,51 \times 2,28 \times 0,62$  м. Площа платформи –  $8 \text{ м}^2$ , об'єм платформи  $5 \text{ м}^3$ , а з надставними бортами –  $10 \text{ м}^3$ . Автомобіль-самоскид ГАЗ-САЗ-35071 не має зчіпного пристрою та не призначений для експлуатації з причепом.

Для обслуговування транспортних агрегатів, не обладнаних засобами самозавантаження, використовують навантажувачі періодичної дії, обладнані

пристосування для навантаження рулонів. Навантажувачі призначені для завантаження в транспортні засоби, переміщення на невеликі відстані, розвантаження та складування різного вантажу призначення. Для роботи з рулонами навантажувачі можуть комплектуватись додатковим обладнанням – кантувачем (захопленням) рулонів або вилами.

Навантажувач-копновоз універсальний ПКУ-0,8 (рис.1.9 а). Навантажувач може оснащуватись різним набором змінних робітників органів: захоплення універсальне, ковші різної місткості, грабельні грати, вила, колодозахоплення і т.д. Для роботи з рулонами навантажувач обладнується захопленням універсальним ПКУ-0,8-18 для роботи з рулонами сіна та сінажу, не упакованими в плівку, та кантувачем рулонів ПМТ-01 (рис.1.9 б), який призначений для захоплення та переміщення рулонів діаметром 1,5.. 1,8 м довжиною 1,2...1,5 м та масою до 900 кг. Забезпечує підйом та опускання на висоту до 3,2 м (по низу рулону, з кантуванням на 90°) як невпакованих рулонів, так і рулонів сінажу, упакованих у плівку, без механічного пошкодження плівки.



Рисунок 1.10 – Завантажувальні засоби для рулонів сінажу:  
а) - навантажувач-копновоз універсальний ПКУ-0,8; б) – кантувач ПМТ-01

Випускається за ліцензією італійської фірми “Tonutti” фронтальний навантажувач FrontLift-800. Він навішується на трактор класу 1,4 та обладнується для роботи з рулонами кантувачем КНР-2100, що здійснює захоплення, переміщення та складування рулонів масою до 850 кг, діаметром 0,7...1,8 м, довжиною 1,2 ... 1,5 м.

Кантувальник здійснює рівномірне захоплення рулонів, має змінний регулювальний шатун для зміни ширини захвату, забезпечує підйом і опускання на висоту до 3,4 м з кантуванням на 90° рулонів без пакування або обернених у плівку без її ушкодження. Більшість виробників сільськогосподарської продукції віддають перевагу самохідним телескопічним навантажувачам. Перевага їх полягає у великій висоті підйому та підвищеної точності подачі вантажу, покращеної маневреності, більшої прохідності (бо більшість навантажувачів забезпечені приводом на всі колеса), універсальності за рахунок застосування додаткового обладнання (різні типи сільськогосподарських вил та грабелів, вила для штучних вантажів, бульдозерні відвали, робочі платформи тощо).

Один із перших у світі телескопічних навантажувачів був розроблений машинобудівною фірмою JCB (Англія). На сьогоднішній день фірма є світовим лідером з випуску телескопічних навантажувачів і пропонує 12 моделей. Одна з найпопулярніших моделей телескопічних навантажувачів – JCB 531-70 є найбільш компактним серед повнорозмірних навантажувачів компанії (рис.1.10а). Її переваги полягають у високій вантажопідйомності – до 3,1 т, хорошій стійкості та потужному двигуні. Максимальна висота підйому вантажу – 7,0 м, радіус повороту – 3,7 м.



а)

б)

Рисунок 1.10 - Навантажувачі самохідні телескопічні: а) - JCB 531-70; б) - Scorpion-6030

Навантажувач самохідний телескопічний Scorpion-6030 (Claas, Німеччина) (Рис. 1.10 б). Вантажопідйомністю до 3,3 т, забезпечує підйом та опускання вантажу на

висоту до 6,25 м. Нова модель самоскидного навантажувача Scorpion-9040 піднімає та опускає вантаж на висоту 9,0 м, масою до 4 т.

Наведена в огляді техніка для заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку, є лише невеликою частиною представлених на світовому ринку машин та агрегатів. Різноманітність типів, моделей, марок машин на виконанні всіх операцій процесу заготівлі сінажу в рулонах робить складним вибір найбільш адаптивних до реальних умов виробництва технічних засобів, їх поєднань та реалізованих ними технологічних варіантів.

### 1.3. Висновки, мета та завдання дослідження

Аналіз досліджень, виконаних у галузі заготівлі кормів, показав, що ефективна технологія заготівлі кормів передбачає досить жорстку взаємодію окремих машин і всіх ланок, що беруть участь у процесі, з дотриманням технологічних вимог, з урахуванням властивостей оброблюваного матеріалу та впливів погодних умов. Досліджень щодо оцінки адаптивності та підвищення ефективності процесу заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку, що охоплюють весь комплекс робіт від скошування травостою до упаковки та укладання корму на зберігання, з урахуванням самонагрівання, з погляду, є недостатньо.

У зв'язку з цим актуальними є аналіз та узагальнення виконаних та проведення нових досліджень з розробки та практичного застосування сучасних підходів, методик для обґрунтованого вибору з усього різноманіття технічних засобів найбільш прийнятних до регіональних природно-господарських умов, машин та агрегатів.

Тому мета дослідження - підвищення ефективності технологічного процесу заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку, за рахунок обґрунтування раціональних параметрів агрегатів і машин, з урахуванням властивостей оброблюваного матеріалу.

Для реалізації поставленої мети дослідження намічено виконання наступних завдань:

1. виявити фактори, що впливають на ефективність кормозбирального процесу, та на їх основі розробити схему механізованого процесу заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку;
2. обґрунтувати раціональні схеми руху навантажувачів та транспортувальників рулонів з метою досягнення їх максимальної продуктивності;
3. теоретично обґрунтувати та виконати моделювання технологічного процесу заготівлі сінажу в рулонах, що упаковані у плівку;
4. визначити статистичні характеристики основних експлуатаційно-технологічних параметрів кормозбиральних, вантажно-транспортних машин та пакувальників рулонів;
5. дати оцінку результатів досліджень та розробити практичні рекомендації щодо вибору раціонального комплексу машин для заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку.

## РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗАГОТІВЛЯ СІНАЖУ В РУЛОНАХ, ЩО ЗАПАКОВАНІ У ПЛІВКУ

### 2.1 Функціональна модель процесу заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку

Загальну модель процесу заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку, можна подати у вигляді безлічі величин, що описують процес функціонування реальної системи та утворюють у загальному випадку наступні підмножини:

- сукупність вхідних некерованих впливів на систему:

$$x_i \in X, \quad i = \overline{1, n_x}; \quad (2.1)$$

- сукупність вхідних керованих впливів на систему:

$$u_k \in U, \quad k = \overline{1, n_u}; \quad (2.2)$$

- сукупність внутрішніх (власних) параметрів системи:

$$s_l \in S, \quad l = \overline{1, n_s}; \quad (2.3)$$

- сукупність впливів зовнішнього середовища:

$$v_m \in V, \quad m = \overline{1, n_v}; \quad (2.4)$$

- сукупність вихідних характеристик системи:

$$y_j \in Y, \quad j = \overline{1, n_y}. \quad (2.5)$$

Як і всі імітаційні моделі, модель процесу заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку, можна подати у вигляді так званого "чорної скриньки", в якій вихідний сигнал системи  $Y$  видається при надходженні вхідного сигналу  $X$  або  $U$ , а також впливу зовнішнього середовища  $V$  на будь-яку із взаємодіючих підсистем із внутрішніми параметрами  $S$  (рис. 2.1).

У нашій моделі вхідними або незалежними змінними є некеровані  $X$  та керовані  $U$  впливу на систему, внутрішні параметри системи  $S$ , а також впливу зовнішнього середовища  $V$ , які у векторній формі мають вигляд:

$$\bar{x}(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_{nX}(t)\}; \quad (2.6)$$

$$\bar{u}(t) = \{u_1(t), u_2(t), \dots, u_{nU}(t)\}; \quad (2.7)$$

$$\bar{s}(t) = \{s_1(t), s_2(t), \dots, s_{nS}(t)\}; \quad (2.8)$$

$$\bar{v}(t) = \{v_1(t), v_2(t), \dots, v_{nV}(t)\}. \quad (2.9)$$

Вихідні характеристики системи  $Y$  є залежними змінними і у векторній формі мають вигляд:

$$\bar{y}(t) = \{y_1(t), y_2(t), \dots, y_{nY}(t)\}. \quad (2.10)$$

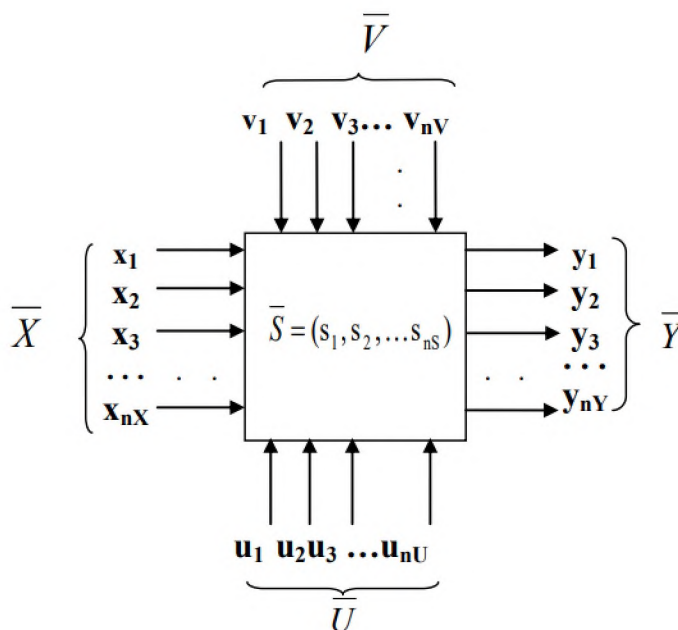


Рисунок 2.1 - Імітаційна модель процесу заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку, у загальному вигляді (“чорна скринька”)

З сукупності вхідних некерованих впливів на систему процесі заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку, можна виділити:

$x_1$  – урожайність трав;

$x_2$  – площа збирання;

$x_3$  – довжина гону;

$x_4$  – відстань перевезення кормів;

$x_5$  – вид та сорт трав'яної культури (її технологічні властивості).

До вхідних керованих впливів на систему можна віднести:

$u_1$  - варіант технологічної схеми кормозбирального процесу;

$u_2$  – якісний (марочний) склад комплексу кормозбиральних машин;

$u_3$  – кількісний склад комплексу кормозбиральних машин;

$u_4$  – змінність роботи;

$u_5$  – терміни проведення кормозбиральних робіт.

До впливів зовнішнього середовища належать:

$v_1$  – температура повітря;

$v_2$  – відносна вологість повітря;

$v_3$  – швидкість вітру;

$v_4$  – тривалість випадання опадів;

$v_5$  – кількість опадів, що випали.

Внутрішні параметри системи – це насамперед:

$s_1$  – вплив елементів системи на оброблюваний матеріал;

$s_2$  – взаємодія машин комплексу.

До вихідних характеристик системи можна віднести:

$y_1$  – вихід урожаю;

$y_2$  - сумарні втрати корму, що заготовлюється;

$y_3$  – продуктивність системи;

$y_4$  - сукупні грошові витрати;

$y_5$  - трудовитрати;

$y_6$  – енерговитрати;

$y_7$  – витрати палива;

$y_8$  - вихід тваринницької продукції;

$y_9$  - прибуток та інші.

Процес функціонування системи  $S$  описується у часі оператором  $F_s$ , який перетворює входні некеровані  $X$  та керовані  $U$  впливу на систему, а також внутрішні параметри системи  $S$  у вихідні  $Y$  відповідно до закону функціонування системи:

$$\bar{y}_i(t) = F_s(\bar{x}, \bar{u}, \bar{s}, t). \quad (2.11)$$

Ввівши в систему оператор  $F_v$ , що враховує вплив зовнішнього середовища  $V$ , отримаємо рівняння:

$$\bar{y}(t) = F_v(\bar{y}_s, t) = F_v[F_s(\bar{x}, \bar{u}, \bar{s}, \bar{v}, t)]. \quad (2.12)$$

Це співвідношення можна отримати через властивості системи S в конкретні моменти часу, звані станами. Якщо відомо характеристики початкового стану системи  $z^0$ , то будь-якої миті часу  $t(t_0 < t < T)$  векторне рівняння поточного стану системи запишеться у вигляді:

$$\bar{z}(t) = F_z(\bar{z}^0, \bar{x}, \bar{u}, \bar{s}, \bar{v}, t), \quad (2.13)$$

де  $z(t)$  - вектор-функція поточного стану системи в момент часу  $t$ ;

$F_z$  – оператор, що перетворює вхідні характеристики у векторну функцію поточного стану системи.

Вводячи оператор  $F_y$ , що пов'язує характеристики поточного стану системи S (напрацювання, що становлять баланс часу роботи) з її вихідними характеристиками (критерії ефективності), отримуємо векторне рівняння, що визначає результати функціонування системи в будь-який момент часу на інтервалі  $(t_0, T)$ :

$$\bar{y}(t) = F_y[F_z(\bar{z}^0, \bar{x}, \bar{u}, \bar{s}, \bar{v}, t)], \quad (2.14)$$

де  $F_y$  - оператор, що перетворює характеристики поточного стану системи у вектор-функцію системи у будь-який момент часу.

Вирішувати завдання побудови моделі складної виробничої системи загальному вигляді, враховуючи відразу всі параметри та впливи нераціонально. Побудована таким чином модель є громіздкою і не є універсальною. При внесення доповнень та змін до такої моделі потрібна її повна модернізація. Більш раціонально використовувати блоковий принцип побудови моделі, який дозволяє будувати модель поетапно для кожного блоку або підсистеми, а потім синтезувати блоки у єдину модель.

У структурі імітаційної моделі процесу заготівлі сінажу в упаковці виділяються п'ять блоків (рис. 2.2):

- блок 1 формування умов функціонування процесу – зовнішні некеровані X та керовані U впливів на систему;

- блок 2 імітації технологічних операцій - оператор  $F_s$  перетворює вхідні дії X і

У та внутрішні параметри системи  $S$  у вектори  $Z_{Pj}(t)$ , що характеризують стан підсистем у момент часу  $t$ ;

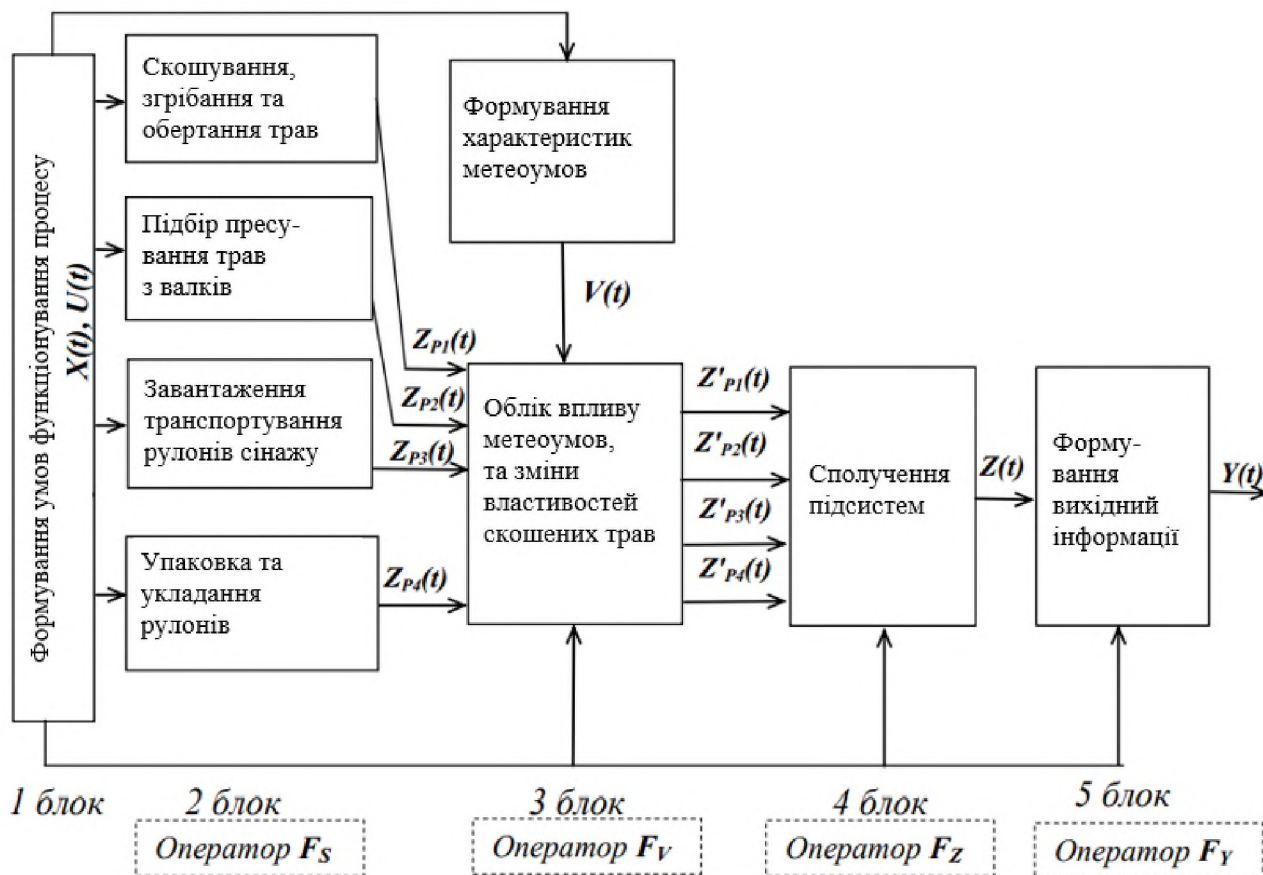


Рисунок 2.2 - Блокова структура моделі процесу заготівлі сінажу у рулонах, упакованих у плівку

- блок 3 моделювання впливів зовнішнього середовища - оператор  $F_V$  формує вектор характеристик метеоумов  $V(t)$ , що враховує зміни технологічних властивостей оброблюваного матеріалу (вологості та температури трав'яної маси) та коригуючий траєкторії станів підсистем внаслідок впливу метеоумов  $Z'_{Pj}(t)$ ;

- блок 4 сполучення технологічних операцій - оператор  $F_Z$  сполучає вектори  $Z_{Pj}(t)$  і  $V(t)$  з урахуванням параметрів системи  $S$ , властивостей матеріалу, що змінюються, і формує вектор станів системи  $Z(t)$ ;

- блок 5 обробки результатів реалізації моделі та формування вихідних характеристик системи - оператор  $F_Y$ , що перетворює вектор станів системи  $Z(t)$  вектор вихідних характеристик  $Y(t)$ .

Переваги запропонованої моделі, побудованої за блочним принципом, полягають у гнучкості та універсальності. При блочному побудові модель здатна до подальшого розвитку та постійного вдосконалення. Вона адаптована до змінних умов функціонування системи, легше пристосовується для вивчення подібних виробничих систем.

## 2.2. Моделюючий алгоритм процесу заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку

На основі системного підходу до дослідження процесу заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку, та його функціональної моделі розроблено моделюючий алгоритм загальної імітаційної моделі кормозбирального процесу

[7-12]. Моделюючий алгоритм (рис.2.3) відображає реальну структуру механізованого процесу заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку.

Оператори 1 і 2 здійснюють запуск моделі та введення вихідних даних, що характеризують природно-господарські умови функціонування кормозбирального комплексу, експлуатаційно-технологічні та техніко-економічні параметри машин, що використовуються.

Оператор 3 починає імітацію кормозбирального процесу першого дня. Спочатку він обнуляє всі масиви, в яких згодом накопичується інформація про результати роботи окремих ланок і всього технологічного комплексу, формує для кожного працюючого агрегату напрацювання в часі до настання чергової відмови.

Оператор-підпрограма 4 формує як випадкову величину погодні умови кожного дня роботи комплексу. Наступні оператори-підпрограми – з 5 по 13 – відтворюють виконання які входять у структуру процесу технологічних операцій.

Описується технологічна схема процесу скошування-пров'ялювання трав, що рекомендується для заготівлі сінажу в рулонах, що включає скошування трав у прокос або широкий валок (оператор 5), зворушення скошених трав або розкидання валків ворошителями-спушувачами (оператор 6) і згрібання пров'ялених трав у валок

(оператор 7), параметри якого мають забезпечити умови ефективної роботи прес-підбирачів.

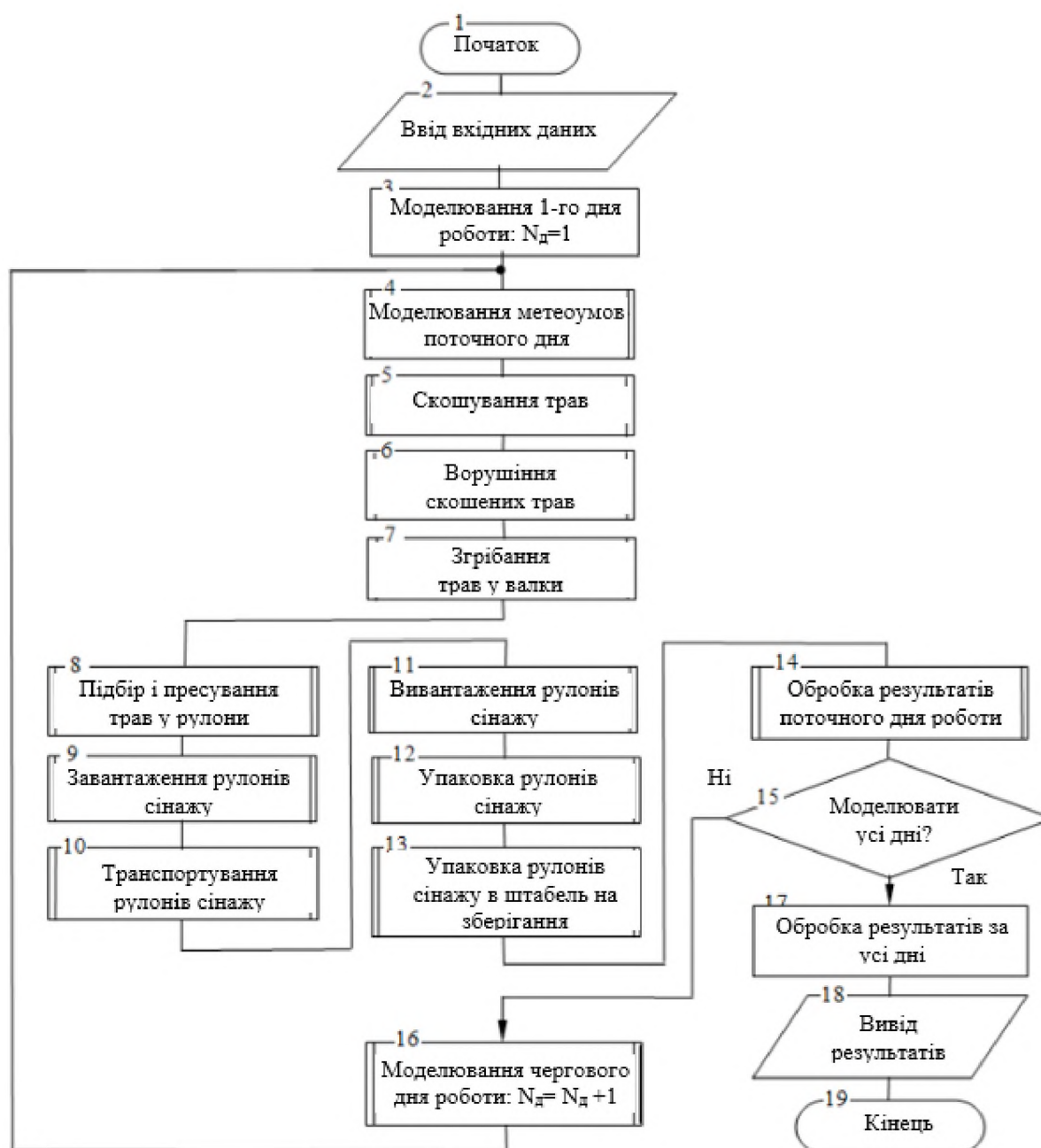


Рисунок 2.3 – Блок-схема моделюючого алгоритму процесу заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку

Технологічна операція підбору трав'яної маси та пресування її в рулони підвищеної щільності описується оператором 8. Оператори 16 і 17 імітують навантаження та транспортування рулонів сінажу до місця зберігання. А оператори

18, 19 та 20 – відповідно: розвантаження, пакування та укладання на зберігання рулонів сінажу. Логіка подій моделюючого алгоритму за структурою та послідовністю дій повністю відповідає реальному процесу заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку.

Реалізація імітаційної моделі процесу заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку, побудованої за наведеним алгоритмом, дозволяє при наявності об'єктивної вихідної інформації про умови функціонування системи, властивості матеріалу, характеристики агрегатів отримувати достовірні вихідні дані про продуктивність і надійність системи та її підсистем, втрати корму, витрати коштів, праці, енергії. Цих даних достатньо в подальшому для обґрунтованого вибору раціональної технології та комплексу машин за умов конкретного сільськогосподарського підприємства.

### 2.3. Закономірності розподілу рулонів сінажу полем

Продуктивність та ритмічність функціонування процесу заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку, значною мірою залежить від чіткості та ефективності взаємодії вантажних та транспортних засобів, зайнятих у технологічному процесі. Спресовані корми у вигляді рулонів розподіляються поверхнею поля з певною закономірністю (рис. 2.4).

При моделюванні та дослідженні кормозбирального процесу [8-12] правильна організація взаємодії збиральних, вантажних і транспортних агрегатів істотно впливає на динаміку та результати його функціонування. Так при заготівлі пресованих кормів ритмічність роботи вантажних засобів (проміжки часу між навантаженням рулонів) залежить від розташування рулонів на полі та схеми (напрямку) переміщення навантажувача від рулону до рулону. У різні моменти часу навантажувачу вигідніше, з погляду мінімізації сумарного пробігу по полю (а значить і підвищення продуктивності його роботи), переміщатися або вздовж напрямку формування рулонів, або в поперечному напрямку, занурюючи рулони із сусідніх рядів. Тому при імітаційному моделюванні процесу заготівлі сінажу в рулонах,

упакованих у плівку, та оцінки ефективності взаємодії вантажних та транспортних агрегатів при різних схемах переміщення навантажувача від рулону до рулону, доцільно мати модель, що описує розташування рулонів корму на полі.

При накладенні на поле системи координат – осі Y вздовж довжини поля L та осі X уздовж ширини поля B координати будь-якого рулону можуть бути визначені з з урахуванням порядкового номера рулону i, маси рулону  $G_p$ , ширини поля, з якої формується валок  $B_{фв}$ , урожайності трав на корм  $U_k$  та робочої довжини поля  $L_p$  (рис 2.5).

Положення точки завершення формування i рулону на полі залежить від положення місця початку його формування та довжини шляху прес-підбирача при підборі валка, яка потрібна на формування рулону ( $L_{фр}$ ).

Очевидно, що місце завершення формування попереднього рулону буде місцем початку формування наступного його чергового рулону. При відомих розмірах рулону (діаметр  $D_p$ , висота  $H_p$ ) та рекомендованої по технології заготівлі корму його щільності  $\rho_p$  маса рулону, що формується  $G_p$  (кг) складе:

$$G_p = \rho_p \cdot H_p \cdot \pi \cdot D_p^2 / 4. \quad (2.15)$$

Довжина валка  $L_{фр}$  (м), необхідна для формування рулону масою  $G_p$ :

$$L_{фр} = G_p / (B_{фв} \cdot U_k). \quad (2.16)$$

Під час руху прес-підбирача від осі абсцис (від початку поля до його іншого кінця) відстань від сформованого рулону до осі абсцис (ордината  $y_i$ ) при непарному номері валка пв визначається залежністю:

$$y_i = i \cdot L_{фр} - (n_p - 1) \cdot L_p, \quad (2.17)$$

де i – порядковий номер рулону;

$L_p$  – робоча довжина поля чи гону, м;

$n_p$  - порядковий номер підбирається прес-підбирачем валка при формуванні i-го рулону - визначається як ціла частина числа, отриманого у правій частині виразу (2.18):

$$n_p = \lfloor i \cdot L_{фр} / L_p + 1 \rfloor. \quad (2.18)$$

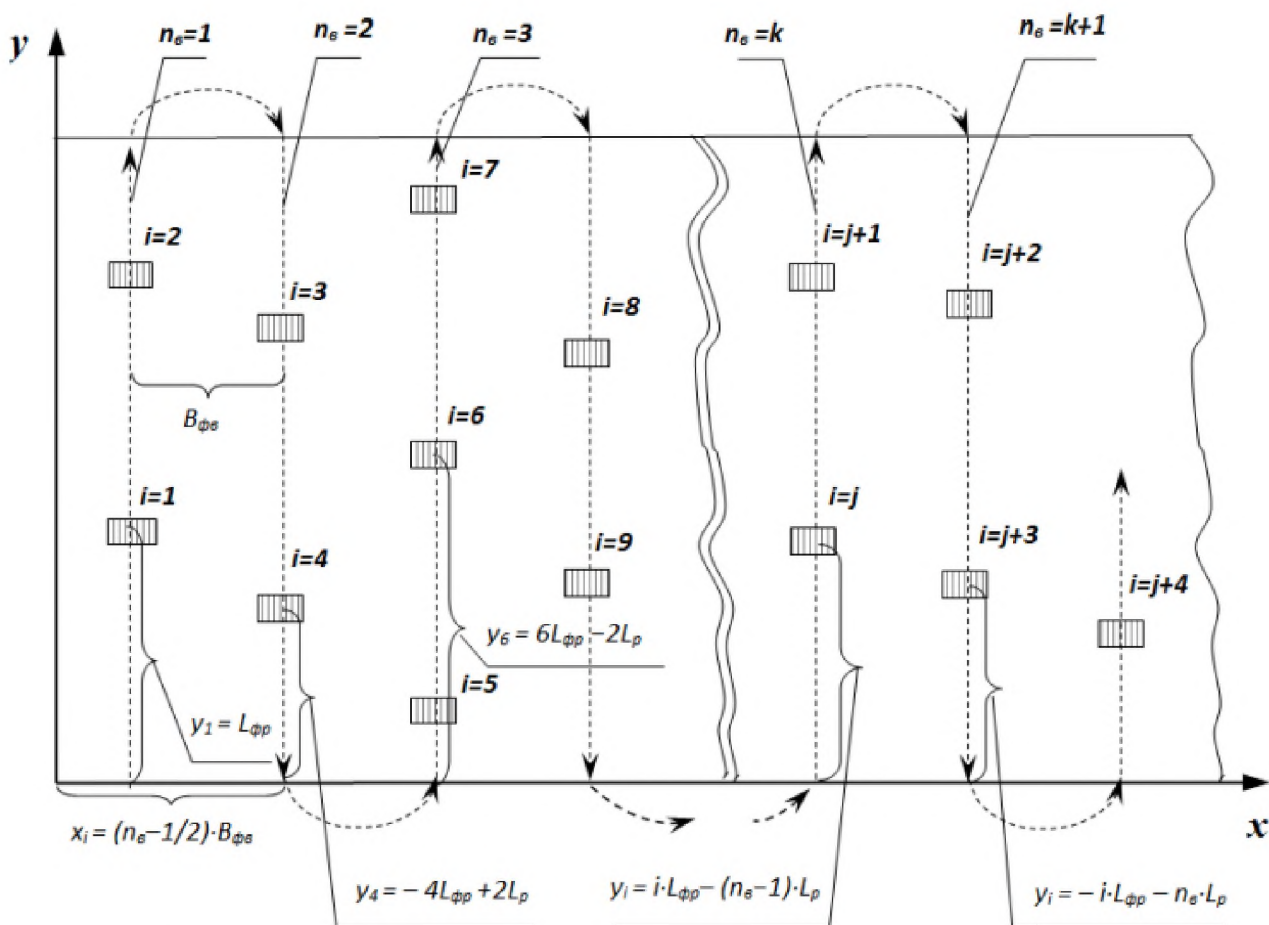


Рисунок 2.4 – Схема розташування на полі рулонів, сформованих прес-підбирачем

Під час руху прес-підбирача до осі абсцис відстань від сформованого рулону до неї (ордината  $y_i$ ) при парному номері валка  $n_{\sigma}$ :

$$y_i = -i \cdot L_{\phi p} + n_{\sigma} \cdot L_p \quad (2.19)$$

У загальному вигляді відстань від точки розташування  $i$  рулону до осі абсцис, тобто. ордината розташування рулону у прийнятій системі координат, визначається залежністю:

$$y_i = (-1)^{(n_{\sigma}+1)} \cdot L_{\phi p} + (-1)^{(n_{\sigma}+1)} \cdot (n_{\sigma} - \lfloor n_{\sigma} - i \cdot L_{\phi p} / L_p \rfloor) \cdot L_p \quad (2.20)$$

Абсцис точки завершення формування  $i$ -го рулону змінюється дискретно – пропорційно ширині поля  $B_{\phi}$ , з якої формується валок, що підбирається:

$$x_i = (n_{\sigma} - 1/2) \cdot B_{\phi\sigma} \quad (2.21)$$

звідки

$$B_{\phi s} = x_i / (n_s - 1/2). \quad (2.22)$$

Підставивши  $B_{\phi}$  у вираз (2.16), отримаємо:

$$L_{\phi p} = G_p \cdot (n_s - 1/2) / (x_i \cdot U_{\kappa}). \quad (2.23)$$

Тоді співвідношення між ординатою  $y_i$  та абсцисою  $x_i$  точки розміщення а поле  $i$ -го рулону описується виразом:

$$y_i = (-1)^{(n_s+1) \cdot i} \cdot G_p \cdot (n_s - 1/2) / (x_i \cdot U_{\kappa}) - (n_s - k) \cdot L_p. \quad (2.24)$$

Виявлені закономірності розподілу по полю рулонів сінажу використовуються при моделюванні кормозбиральних процесів, опис взаємодії агрегатів на підборі-пресуванні корму, навантаженні та транспортуванні рулонів до місць упаковки та укладання на зберігання.

## 2.4. Висновки до розділу 2

1. Запропонована функціональна модель процесу заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку, побудована за блочним принципом, здатна подальшого розвитку та постійного вдосконалення. Вона адаптована до змінних умов функціонування системи, легко пристосовується для вивчення подібних виробничих систем.
2. Запропоновано моделюючий алгоритм процесу заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку.
3. Для організації чіткої та ефективної роботи вантажних та транспортних засобів, зайнятих у процесі заготівлі сінажу в рулонах, запропоновано модель розподілу рулонів корму на полі.

## РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 3.1. Програма та загальна методика дослідження

На основі поставлених завдань розроблено програму дослідження, що складається з наступних основних розділів:

- розробка методики проведення дослідження;
- теоретичні дослідження, що включають розробку моделі технологічного процесу заготівлі сінажу; моделювання взаємодії збиральних, транспортних та пакувальних машин з урахуванням технологічних, що змінюються властивостей оброблюваного матеріалу;
- експериментальні дослідження з вивчення динаміки самонагрівання сінажної маси в рулонах, визначення статистичних характеристик експлуатаційно-технологічних параметрів кормозбиральних, вантажних, транспортних та пакувальних машин;
- реалізація моделі кормозбирального процесу та обґрунтування раціональних агрегатів на виконанні окремих технологічних операцій; обґрунтування раціональних технологічних схем та комплексів машин на заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у поліетиленову плівку;

Технологія заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку, є багатостадійним, багатоваріантним виробничим процесом, що є схильним до впливу факторів зовнішнього середовища, і розглядається як складна виробнича система. Тому за методологічну основу досліджень прийнято системний підхід, який передбачає дослідження системи як єдиного цілого. Система розглядається як сукупність складових її підсистем (технологічних ланок) та елементів (машини та агрегати), тісно пов'язаних між собою та функціонуючих відповідно до загальної системної мети.

Як основний метод дослідження складного та багатоваріантного по структурі, стохастичного за характером перебігу процесу заготівлі сінажу в рулонах, упакованих

у плівку, прийнято метод імітаційного моделювання. Сутність цього методу полягає у створенні моделі, що відтворює реальну систему, та проведенні з цією моделлю обчислювальних експериментів з метою вивчення закономірностей поведінки системи або оцінки різних варіантів та стратегій, що забезпечують ефективне функціонування даної системи у заданих умовах відповідно до обраних критеріїв [9-12].

Аналізуючи методику та приклади імітаційного моделювання реальних систем [9-12] можна виділити такі етапи цього процесу:

- визначення меж, діапазону умов функціонування, вихідних показників ефективності системи, що підлягає вивченню;
- формалізація реальної системи – формулювання моделі;
- збір та обробка даних, необхідних для побудови та реалізації моделі;
- оцінка адекватності моделі реальної виробничої системи, визначення ступеня достовірності результатів реалізації моделі;
- планування обчислювального експерименту на ЕОМ, що забезпечує отримання вихідної інформації заданої достовірності;
- реалізація моделі на ЕОМ відповідно до плану експерименту, збір вихідний інформації;
- аналіз даних, отриманих під час проведення обчислювальних експериментів;
- розробка практичних рекомендацій щодо результатів моделювання;
- реалізація практично результатів моделювання.

Методами імітаційного моделювання та натурними експериментами нами досліджуються процеси заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку, реалізовані за різними технологічними варіантами, різними збирально-транспортними комплексами (ЗТК). Відтворюючи на ЕОМ за допомогою розробленої моделі роботу ЗТК різного складу в різних виробничих та кліматичних умовах та обробляючи результати їх роботи, отримуємо показники ефективності для кожного із досліджуваних комплексів. При проведенні експерименту з моделлю в як вхідні дані прийнято параметри законів розподілу випадкових величин, що характеризують функціонування кожного з елементів ЗТК та впливу довкілля. Більшість вхідної

інформації має імовірнісний характер, тому експеримент проводиться багаторазово по кожному з досліджуваних технологічних варіантів, що забезпечує необхідну точність та достовірність отриманих результатів.

Адекватність розробленої моделі реальної система перевіряється даними натурних експериментів, отриманих у виробничих умов. Методичною основою експериментальних досліджень, що проводяться є теорія планування експерименту, теорія ймовірностей та математична статистика.

### 3.2. Методика дослідження динаміки самонагрівання рулонів сінажу та обґрунтування допустимих розривів у часі між формуванням рулону сінажу та його упаковкою

Технологія заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку, передбачає чітку взаємодію машин на виконанні всіх технологічних операцій процесу – від скошування трав до герметизації в рулонах. Якісний корм можна отримати лише за дотримання рекомендованої вологості трав'яної маси на всіх етапах кормозбирального процесу, тобто розриви в часі та обробленої площі між суміжними технологічними операціями мають постійно витримуватись. Особливо актуальна ця вимога для операцій підбору-пресування пров'ялених трав, навантаження-транспортування та пакування рулонів у плівку. Це обумовлено тим, що спресована в рулони трав'яна маса вологістю від 40 до 60% при слабкій вентиляції внутрішніх шарів рулону дуже інтенсивно самонагрівається. Цьому сприяють достатнє у розвиток мікроорганізмів вміст вологи в рослинах та наявність повітря в рулоні. Для зупинки небажаних мікробіологічних процесів у рулоні його сінажу потрібно упакувати в плівку відразу після формування або через невеликий допустимий проміжок часу. Це необхідно, щоб унеможливити нагрівання маси до температури вище 37...38 оС, при якій починається розпад білків і значно погіршується перетравність всіх компонентів корму.

Однак дуже короткий період часу від формування рулону до його упаковки ускладнює організацію транспортного обслуговування кормозбирального процесу, позбавляє його гнучкості та маневреності, змушує резервувати парк вантажних та транспортних засобів, що здорожує собівартість корму [9, 13,].

Для оптимізації взаємодії машин на підборі-пресуванні трав, навантаження, транспортування та пакування рулонів нами проведено дослідження динаміки самонагрівання пров'яленої трав'яної маси в рулонах і визначені допустимі розриви в часі від пресування трав до їх герметизації рулонах. Попередній аналіз досліджень та практичного досвіду заготівлі сінажу в рулонах показує, що основними факторами, що впливають на динаміку самонагрівання ущільненої трав'яної маси, є технологічні керовані фактори – вологість маси та ступінь її ущільнення, а також некеровані фактори – параметри навколишнього повітря – температура, відносна вологість та швидкість вітру.

Для оцінки ступеня впливу керованих факторів на динаміку процесу самонагрівання спресованої трав'яної маси в польових умовах визначаються закономірності зміни температури пров'яленої люцерни в рулонах з вологістю, близькою до меж можливого для заготівлі сінажу діапазону – 40% та 60%. За такої вологості пров'ялених трав формуються рулони щільністю: мінімальною – 110..115 кг/м<sup>3</sup>, середньої – 150..160 кг/м<sup>3</sup> і максимальної – 175... 185 кг/м<sup>3</sup> (щільність матеріалу вказана у перерахунку на суху речовину).

Рулони потрібної щільності формуються в такий спосіб. На полі вибираються за допомогою експрес-вологомірів зеленої маси та стебельчастих кормів WILE-26T валки, вологість трави в яких близька до кордонів досліджуваного діапазону – близько 40% та близько 60%. У відповідних валків визначається маса погонного метра та розраховується довжина валка, з якої необхідно формувати рулон заданої маси, щоб забезпечити необхідну густину корму. Для розрахунків використовується вираз:

$$L_{\text{фр}} = \frac{G_p}{m_{\text{п.м}}} = \frac{\rho_{\text{св}} \cdot \pi \cdot D_p^2 \cdot H_p}{(1 - W_m / 100) \cdot m_{\text{п.м}}}, \quad (2.1)$$

де  $L_{\text{фр}}$  - Довжина валка, з якої формується рулон заданої маси  $G^p$ , м;

$G_p$  - маса рулону сінажу, кг;

$m_{\text{ПМ}}$  – маса одного погонного метра валка, кг/м;

$\rho_{\text{СВ}}$  – густина трав'яної маси в рулоні в перерахунку на суху речовину, кг/м<sup>3</sup>;

$W_M$  – вологість трав'яної маси, %;

$D_p$  і  $H_p$  – відповідно, діаметр та висота рулону, м.м.

Рулони, сформовані з розрахункової довжини валка, звозяться на край поля, де за допомогою вологомірів WILE-26Т уточнюється вологість трав'яної маси рулонах, та проводяться вимірювання її температури температурним зондом вологоміра WILE-26Т у 3-х перерізах торця рулону: у центрі, за 10 см від зовнішньої циліндричної поверхні та посередині між цими перерізами. Вимірювання здійснюються на глибині 50...60 см вздовж осі рулону в триразовій повторності. Інтервал між вимірами у кожному досліджуваному перерізі складає близько 2 годин.

Після проведення експериментів рулони доставляються на ферму, зважуються на терезах, і уточнюється їхня дійсна щільність. Обробка отриманих в ході експерименту результатів здійснюється з використанням пакета статистичної обробки даних Statistica.

В результаті обробки даних отримуємо залежності температури трав'яної маси  $t_m$  від тривалості  $T_{\text{П}}$  перебування рулону на полі після його формування -  $t_m = f(T_{\text{П}})$ , при різній вологості та щільності корму.

Отримані залежності температури трав'яної маси від тривалості перебування рулону сінажу на полі після його формування можуть бути використані для обґрунтування максимальних допустимих розривів у часі між формуванням рулону та його упаковкою при різних технологічних властивості корму – вологості та щільності.

Розрив у часі  $T_{\text{фуд}}$  між формуванням рулону сінажу та його упаковкою для встановлених вологості  $W_M$  та щільності  $\rho$  трав'яної маси визначається згідно з виразом:

$$T_{\text{фуд}} = (t_{m\text{д}} - t_{m\text{н}}) / \theta_t, \quad (3.2)$$

де  $T_{\text{фуд}}$  - розрив у часі між формуванням рулону сінажу та його упаковкою, год;

$t_{мн}$  – початкова температура маси в рулоні, °С;

$t_{мд}$  - допустима температура маси в рулоні, °С;

$\theta_t$  - швидкість підвищення температури маси в рулоні, °С/год.

Враховуючи, що самонагрівання продовжиться в рулоні протягом деякого часу та після герметизації, до заміщення кисню повітря вуглекислим газом від дихання рослин, що допускається при герметизації рулону трав'яної маси має перевищувати 32...34 °С.

Для обґрунтування допустимих розривів у часі  $T_{фуд}$  між формуванням рулону сінажу та його упаковкою при різній вологості та щільності трав'яної маси необхідно проведення експериментів і шляхом статистичної обробки отриманих даних встановити залежність швидкості зміни температури корму в рулоні від його технологічних властивостей –  $\theta_t = f(W_m, \rho)$ .

### 3.3. Обґрунтування необхідної кількості реалізацій моделі та оцінка адекватності результатів моделювання

Результати роботи ЗТК, отримані шляхом реалізації імітаційної моделі, що носять випадковий характер. Для забезпечення статистичної стійкості отриманих результатів їх середні значення визначаються необхідної кількості повторностей (реалізацій). Кожному вихідного параметру у відповідає середнє значення  $\hat{y}$ . Вибір кількості реалізацій визначається необхідною точністю та достовірністю результатів моделювання.

Точністю оцінки  $y$  є величина  $\varepsilon$ , для якої виконується умова:

$$|y - \bar{y}| < \varepsilon,$$

а достовірністю оцінки є ймовірність того, що виконується нерівність:

$$\alpha = P\{|y - \bar{y}| < \varepsilon\}.$$

Відповідно до центральної граничної теореми теорії ймовірностей частота  $m/N_p$ , що є оцінкою ймовірності при досить великому кількості реалізацій  $N_p$ , має розподіл, близький до нормального, та точність  $\varepsilon$  залежить від кількості реалізацій моделі [9-12]:

$$\varepsilon = t_L \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{N_p}},$$

де  $t_L$  - квантиль нормального розподілу порядку  $L=(1+\alpha)/2$ ;

$\sigma$  - середньоквадратичне відхилення.

Якщо задана необхідна точність результатів експерименту  $\varepsilon$  то досягти її можна за мінімальної необхідної кількості реалізацій моделі  $N_T$ :

$$N_T = \frac{t_L^2 \times \sigma}{\varepsilon^2}.$$

До реалізації моделі середньоквадратичне відхилення  $\sigma$  невідомо. Тому для визначення необхідної кількості реалізацій проводимо попередню серію дослідів з  $N_0 = 5 \dots 10$  реалізацій [13], за їх результатами визначаємо дисперсію  $\sigma^2$  та середньоквадратичне відхилення  $\sigma$ , та уточнюємо кількість реалізацій моделі  $N_T$  для досягнення необхідної точності  $\varepsilon$  та достовірності  $\alpha$  результатів моделювання.

### 3.4.Висновки до розділу 3

1. Для проведення експериментальних досліджень використовувалось методика, що ґрунтувалась на числовому проведенні експериментальних досліджень
2. Були використані відомі та створено нові методики експериментальних досліджень.

## РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 4.1 Технологічні властивості трав та вплив їх на динаміку та ефективність кормозбирального процесу

Якість заготовленого сінажу багато в чому залежить від ряду факторів – виду трав, фази їх розвитку в період збирання, тривалості та рівномірності пров'ялювання в полі. Для приготування сінажу використовують однорічні та багаторічні бобові та злакові трави у чистому вигляді та у складі змішаних травостоїв. Основною та найпоширенішою трав'яною культурою є люцерна. При виборі технологій та машин для скошування та пров'ялювання трав слід враховувати, що найбільш цінними за кормовими властивостями є листя та суцвіття, в яких міститься білкових та мінеральних речовин у 2...3 рази більше, а протеїну – у 5...10 разів більше, ніж у стеблах [1, 5].

Вибір терміну скошування трав з урахуванням їх біологічних властивостей важливою умовою отримання високоякісного корму. У початковий період – до стеблювання у бобових або до виходу в трубку у злаків - зростання маси йде за рахунок листя, а потім – за рахунок стебел. Крім того, пров'ялення рослин у більш пізні фази розвитку пов'язані зі збільшенням механічних і біохімічних втрат поживних речовин, насамперед білка і каротину.

Тому скошувати трави на сінаж доцільніше у фазі бутонізації або пізніше початку цвітіння у бобових трав і фазі виходу в трубку. Збір сухої речовини вище у фазі цвітіння, але загальний збір перетравних поживних речовин у фазі бутонізації більший. Крім того раннє скошування дозволяє отримати більше укосів. В умовах м'яких зим найкращі результати отримують при збиранні посівів люцерни другого та третього років на початку бутонізації.

Залежно від ґрунтово-кліматичної зони тривалість вегетаційного періоду, найбільш сприятливого для збирання однорічних та багаторічних бобових та злакових трав становить 6...12 днів. Коротший сприятливий період відноситься до 1

і 2 ґрунтово-кліматичних зон, більш тривалий - до 3 і 4 зон. Тривалість скошування по кожному типу трав, висіяних в одні й ті самі терміни, не має перевищувати 8...10 днів [8]. Продовження збиральних термінів за межі рекомендованого періоду супроводжується суттєвим збільшенням фізіологічних втрат корму (до 1,5...2% щодня) через зменшення вмісту поживних речовин у травостой та зниження їх перетравності.

Врожайність та якість сінажу безпосередньо залежать від висоти скошування трав. Оптимальна висота скошування багаторічних трав становить 5...6 см, люцерни та люцерно-злакових сумішей – 7...8 см. При надто низькій висоті скошування зменшується врожайність трав у наступні укоси, а зависоке скошування призводить до недобору врожаю в поточному укосі. Крім своєчасного та якісного скошування трав важливим фактором, що надає великий вплив на якість сінажу, є тривалість сушіння скошеної трави в полі. Сушіння слід проводити в найкоротший термін щоб уникнути біохімічних втрат та впливу несприятливих погодних факторів.

Для приготування якісного сінажу дуже важливо на всіх стадіях процесу витримувати вологість трав'яної маси, що рекомендується. Вологість сінажу при консервації становить 45...60%. Оптимальна вологість трав для приготування сінажу – близько 50%. Пров'ялення трав'яної маси до вологості нижче 60% дозволяє нейтралізувати життєдіяльність масляно-кислих бактерій та скоротити витрату цукру на підкислення корму. Пров'ялення трав нижче 45% не рекомендується у зв'язку зі зниженням поживної цінності корму від впливу ультрафіолетового випромінювання, значного зростання механічних втрат найбільш цінної частини рослин – листя та суцвіть та ускладнення пресування сінажної маси через її підвищену жорсткість. Закладка сінажу вологістю понад 55...60% призводить до втрат поживних речовин через витікання соку та біологічні втрати у зв'язку з переходом консервації корму від сінажування – до силосування. Насправді рекомендується починати підбір валків при вологості трав 55 ... 60%, щоб основна кількість скошених трав усунути при оптимальних показниках вологості.

Для прискорення процесу польового сушіння трав доцільно використовувати плющення трав, зворушення та обертання валків. Плющення бобових трав та бобово-

злакових сумішей забезпечує більш рівномірне сушіння стебел і листя і скорочує тривалість їх пров'ялювання в 1,5...1,8 рази. Процес сушіння можна прискорити на 1...3 години ворошінням і обертанням маси, застосування яких особливо ефективно при збиранні в нестійку погоду, а також при високій лінійній щільності трав, що скошуюються у валку.

Від швидкості пров'ялювання трав'яної маси залежить не тільки якість сінажу, що заготовлюється, але і технологічні розриви в часі та обробленої площі між суміжними операціями кормозбирального процесу.

У ході досліджень виявлено, що з досить високим значенням кореляційного відношення  $R = 0,954$  швидкість пров'ялювання люцерни в інтервалі вологості від 78 до 50% може бути описана поліномом другого порядку:

$$v_{50} = -122,8 + 10,42 \cdot t_{\text{в}} - 35,99 \cdot m_{\text{уд}} + 0,99 \cdot t_{\text{в}} \cdot m_{\text{уд}} - 0,20 \cdot t_{\text{в}}^2 + 2,11 \cdot m_{\text{уд}}^2, \quad (4.1)$$

де  $v_{50}$  – швидкість пров'ялювання маси від скошування (вологість трави «на кореню» - 78%) до вологості 50%, % / год;

$t_{\text{в}}$  - середня температура повітря протягом безросного періоду доби (в середньому від 900 до 2100), °C;

$m_{\text{уд}}$  – питома маса (лінійна щільність) валка у перерахунку на суху речовину, (кг/м<sup>2</sup>).

Отримана залежність швидкості вологовіддачі скошеної люцерни використана при моделюванні процесу заготівлі сінажу в упаковці у типових метеорологічних умовах для оцінки тривалості сушіння валка різної лінійної щільності до досягнення вологості, що рекомендується при виконанні операцій згрібання трав, обертання та підбору валків, і для обґрунтування розривів у часі між суміжними операціями процесу заготівлі сінажу в рулонах.

#### 4.2. Динаміка самонагрівання сінажу в рулонах на полі та визначення допустимих розривів у часі між формуванням рулону та його упаковкою

Для визначення динаміки самонагрівання трав'яної маси різної вологості та щільності в рулонах були проведені експериментальні дослідження. Дослідження проводили в типових для заготівлі сінажу умовах: денна температура повітря від 22 °С до 30 °С та відносній вологості повітря від 72 до 41%. Швидкість вітру становила 2...5 м/с.

Вологість маси в рулонах варіювалася на двох рівнях заготівлі сінажу – 40% та 60%. Уточнена під час експериментів вологість трав'яної маси склала на нижньому рівні 36...40% і верхньому рівні – 57...59 %.

Урожайність зеленої маси люцерни становила 156 ц/га. Валки формували з прокошу роторними граблями GR 450 з робочою шириною захвату 4,5 м. Середня маса одного погонного метра валка становила: на нижньому рівні вологості (36...40%)  $m_{\text{ТМ}}=2,7$  кг/м, на верхньому рівні вологості (57...60%)  $m_{\text{ТМ}} = 4,1$  кг/м. Підбір та пресування в рулони пров'ялених трав з валків здійснювали прес-підбирачем R12 Super в агрегаті з трактором МТЗ-82.

Всі рулони, що використовуються в експерименті, мали висоту  $H=1,2$ м; діаметри рихлих рулонів становили  $D=1,24...1,28$  м, рулонів середньої щільності -  $D = 1,36 ... 1,40$  м, рулонів високої щільності -  $D = 1,42 ... 1,46$  м. Варіювання щільності трав'яної маси в рулонах у перерахунку на суху речовину склала на нижньому рівні вологості (36...40%): 112 кг/м<sup>3</sup>, 156 кг/м<sup>3</sup> та 188 кг/м<sup>3</sup>; на верхньому рівні вологості (57...60%): 115 кг/м<sup>3</sup>, 162 кг/м<sup>3</sup> та 190 кг/м<sup>3</sup>.

В результаті обробки експериментальних даних отримано залежності (4.2...4.7) та графіки (рис. 4.1), що характеризують динаміку нагрівання в рулоні маси люцерни різної вологості та щільності.

Статистичні розрахунки показують, що процес нагрівання маси в рулоні досить точно описується рівняннями 1-го порядку (високий рівень значень коефіцієнта кореляції всім отриманих залежностей – від 0,963 до 0,989 – підтверджує їхній лінійний характер):

$$t_M = t_{Mn} + \theta_t \cdot T_n,$$

де  $t_M$  - поточна температура маси в рулоні, °С;

$t_{MH}$  - початкова температура маси в рулоні відразу після пресування, °C;

$\theta_t$  - швидкість збільшення температури маси в рулоні, °C/год;

$T_{II}$  - тривалість періоду після формування рулону, год.

Рівняння нагріву маси вологістю  $w_M$  і щільністю  $\rho_{CB}$  у перерахунку на суха речовина має вигляд:

при  $w_M = 36 \dots 40\%$ ,  $\rho_{CB} = 115 \text{ кг/м}^3$ ,  $t_{MH} = 24,8 \text{ °C}$ :

$$t_M = 24,8 + 0,12 \cdot T_{II}; \quad (4.2)$$

при  $w_M = 36 \dots 40 \%$ ,  $\rho_{CB} = 161 \text{ кг/м}^3$ ,  $t_{MH} = 24,8 \text{ °C}$ :

$$t_M = 24,8 + 0,25 \cdot T_{II}; \quad (4.3)$$

при  $w_M = 36 \dots 40 \%$ ,  $\rho_{CB} = 182 \text{ кг/м}^3$ ,  $t_{MH} = 24,8 \text{ °C}$ :

$$t_M = 24,8 + 0,48 \cdot T_{II}; \quad (4.4)$$

при  $w_M = 57 \dots 59 \%$ ,  $\rho_{CB} = 112 \text{ кг/м}^3$ ,  $t_{MH} = 25,4 \text{ °C}$ :

$$t_M = 25,4 + 0,73 \cdot T_{II}; \quad (4.5)$$

при  $w_M = 57 \dots 59 \%$ ,  $\rho_{CB} = 158 \text{ кг/м}^3$ ,  $t_{MH} = 25,4 \text{ °C}$ :

$$t_M = 25,4 + 2,18 \cdot T_{II}; \quad (4.6)$$

при  $w_M = 57 \dots 59 \%$ ,  $\rho_{CB} = 178 \text{ кг/м}^3$ ,  $t_{MH} = 25,4 \text{ °C}$ :

$$t_M = 25,4 + 2,45 \cdot T_{II}. \quad (4.7)$$

Графіки отриманих залежностей наведено рис. 4.1.

Статистичний аналіз набутих значень  $\theta_t$  дозволив отримати регресійну залежність цього показника від вологості  $w_M$  і щільності  $\rho_{CB}$  трав'яної маси в межах досліджуваних діапазонів ( $w_M = 36\% \dots 59\%$  і  $\rho_{CB} = 112 \dots 182 \text{ кг/м}^3$ ):

$$\theta_t = 2,07 - 0,072 \cdot w_M - 0,029 \cdot \rho_{CB} + 0,00096 \cdot w_M \cdot \rho_{CB} \quad (4.8)$$

з коефіцієнтом кореляції  $R = 0,984$ .

Підставивши отримане значення швидкості нагрівання маси в рулоні формулу (4.1), отримуємо вираз, який можна використовувати на практиці для визначення температури маси в рулоні залежно від її початкової температури  $t_{MH}$ , вологості  $w_M$ , щільності  $\rho_{CB}$  у перерахунку на суху речовину та тривалості періоду часу після її пресування  $T_{II}$ :

$$t_M = t_{MH} + (2,07 - 0,072 \cdot w_M - 0,029 \cdot \rho_{CB} + 0,00096 \cdot w_M \cdot \rho_{CB}) \cdot T_{II}. \quad (4.9)$$

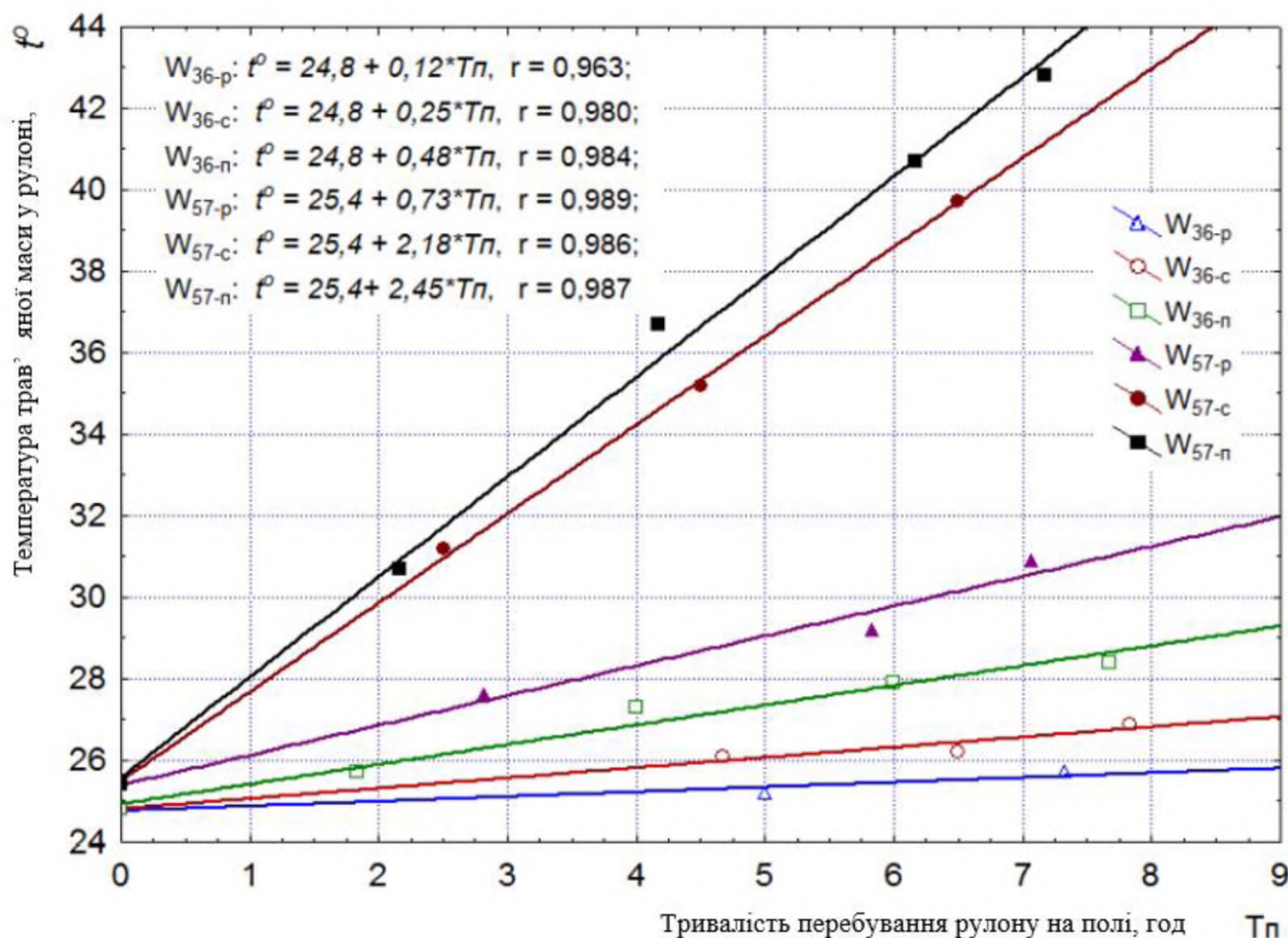


Рисунок 4.1 - Динаміка самонагрівання трав'яної маси в рулонах

На основі отриманої залежності можна визначити гранично допустимі розриви в часі  $T_{фуд}$  між пресуванням та упаковкою рулону в плівку:

$$T_{фуд} = (t_{мд} - t_{мн}) / (2,07 - 0,072 \cdot w_m - 0,029 \cdot \rho_{св} + 0,00096 \cdot w_m \cdot \rho_{св}). \quad (4.10)$$

Допустима температура маси перед упаковкою рулону  $t_{мд} = 32 \dots 34$  °С. Початкова температура маси відразу після її пресування за температури повітря 25 ... 30 °С становить:  $t_{мн} = 24 \dots 26$  °С. Виконані на основі виразу (4.10) розрахунки визначають допустимі розриви у часі між пресуванням та упаковкою рулону (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 - Допустимий розрив у часі між формуванням рулону та його упаковкою в плівку

Вологість маси в рулоні, %	Щільність рулону у перерахунку на суху речовину, кг/м <sup>3</sup>	Допустимий період розриву в часі, год
45	170	5,8
45	180	5,3
45	190	4,8
50	170	4,4
50	180	4,0
50	190	3,7
55	170	3,6
55	180	3,2
55	190	3,0
60	170	3,0
60	180	2,7
60	190	2,5

Аналіз даних табл. 4.1 показує, що з пресуванні трав'яної маси з вологістю, близькою до мінімальної рекомендованої (близько 45%), вимоги до організації взаємодії прес-підбирача, вантажно-транспортних засобів та пакувальника пред'являються менш жорсткі. До того ж при заготівлі трав з такою вологістю, при хорошому ущільненні їх ймовірність появи цвілі в рулоні знижується. Тому раціональний діапазон вологості пресованих трав знаходиться не більше 45...50 %, а чи не вище. При цьому сушіння трав'яної маси на полі повинно бути досить швидкою та рівномірною за рахунок використання раціональних агрегатів на скошуванні та пров'ялюванні трав.

#### 4.3. Статистичні характеристики експлуатаційно-технологічних параметрів кормозбиральних машин

Реалізація ймовірнісної моделі процесу заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку, передбачає використання не усереднених фіксованих даних за основними експлуатаційними параметрами роботи машин, а параметрів, що моделюються в кожному технологічному циклі як довільні величини. Моделювання цих параметрів здійснюється на основі статистичних законів розподілу, отриманих у результаті виробничих випробувань та хронометражних досліджень машин.

Для отримання статистичних характеристик показників роботи машин на заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку, у господарствах проводили експерименти. Досліджували та аналізували роботу у складі кормозбиральних комплексів наступних машин та агрегатів: прес-підбирачів - R-12/2000Super та ПРФ-185 з трактором МТЗ-82; навантажувачів рулонів – МТЗ82+ПФ-0,8 та МТЗ-82+КУН-1,0; пакувальників рулонів індивідуальної обмотки FW10/2000S в агрегаті з трактором МТЗ-82 та пакувальників груповий (рядовий) обмотки Tube Line. В результаті статистичної обробки отриманих нами експериментальних даних та даних машино-випробувальних станцій побудовано гістограми розподілу основних експлуатаційно-технологічних параметрів кормозбиральних машин: робочої швидкості, тривалості повороту, тривалості завантаження рулону, тривалості упаковки рулону сінажу (приклади гістограм наведено нижче).

Враховуючи вид отриманих гістограм експериментальних розподілів та рекомендації вчених про закономірності розподілу показників роботи машин у раніше виконаних дослідженнях [1-9] як теоретичний закон розподілу експлуатаційно-технологічних показників роботи кормозбиральних машин прийнято нормальний закон із щільністю розподілу:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\left\{\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right\}},$$

де  $m$  - математичне очікування;

$\sigma$  – середньоквадратичне відхилення, ( $\sigma^2$ - дисперсія).

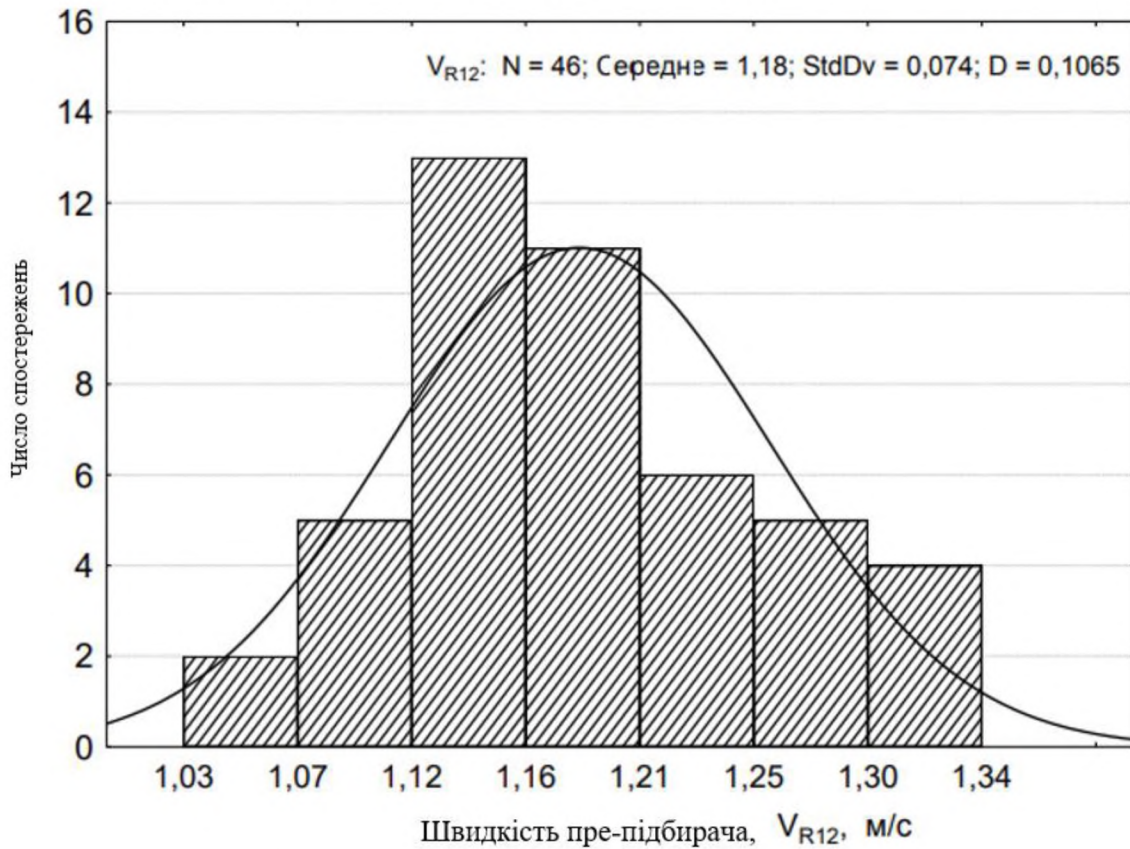


Рисунок 4.2 - Графік розподілу швидкості прес-підбирача R12 Super в агрегаті з трактором МТЗ-82

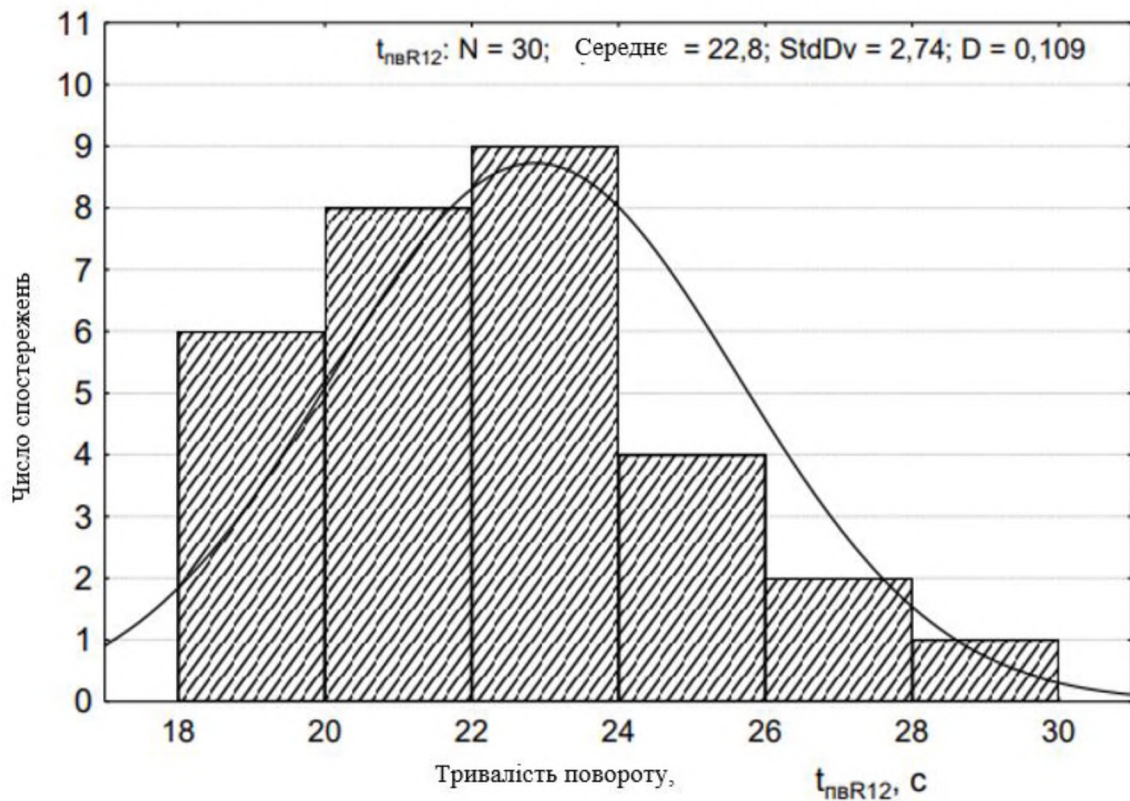


Рисунок 4.3 - Щільність розподілу тривалості повороту прес-підбирача R12 Super в агрегаті з трактором МТЗ-82

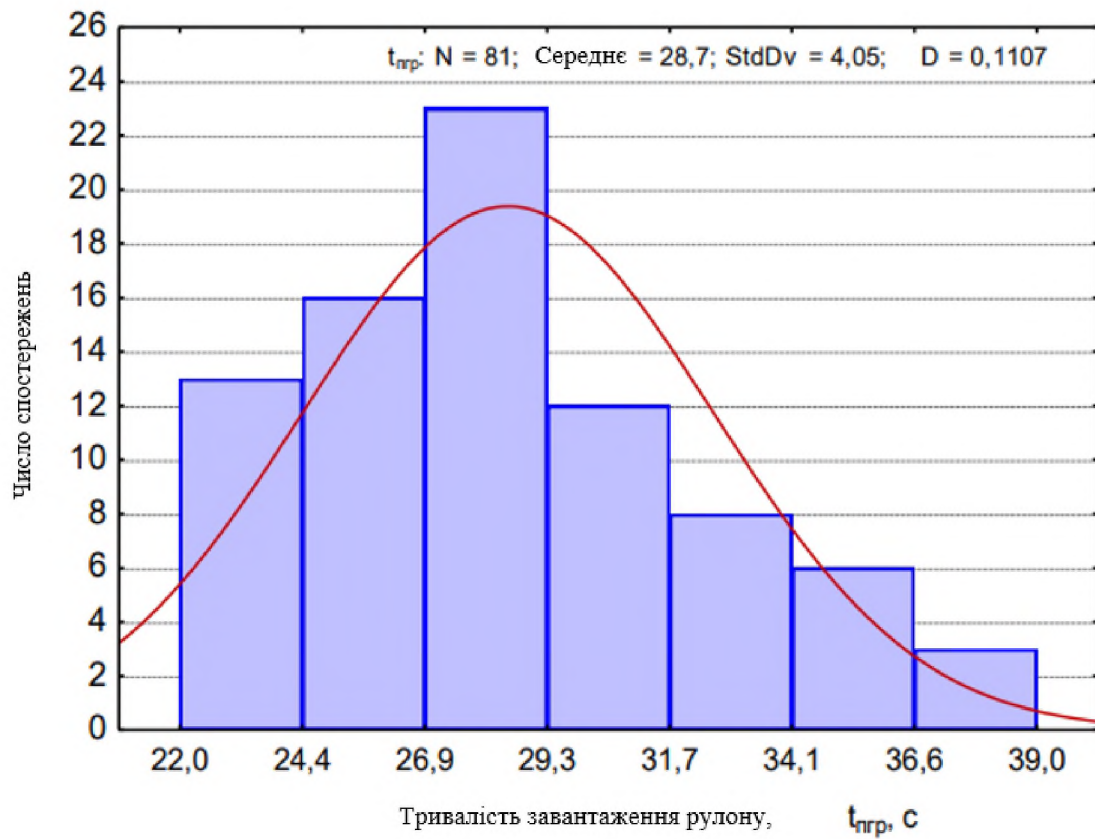


Рисунок 4.4 - Щільність розподілу тривалості навантаження рулону сінажу навантажувачем КУН-0,8 в агрегаті з трактором МТЗ-82

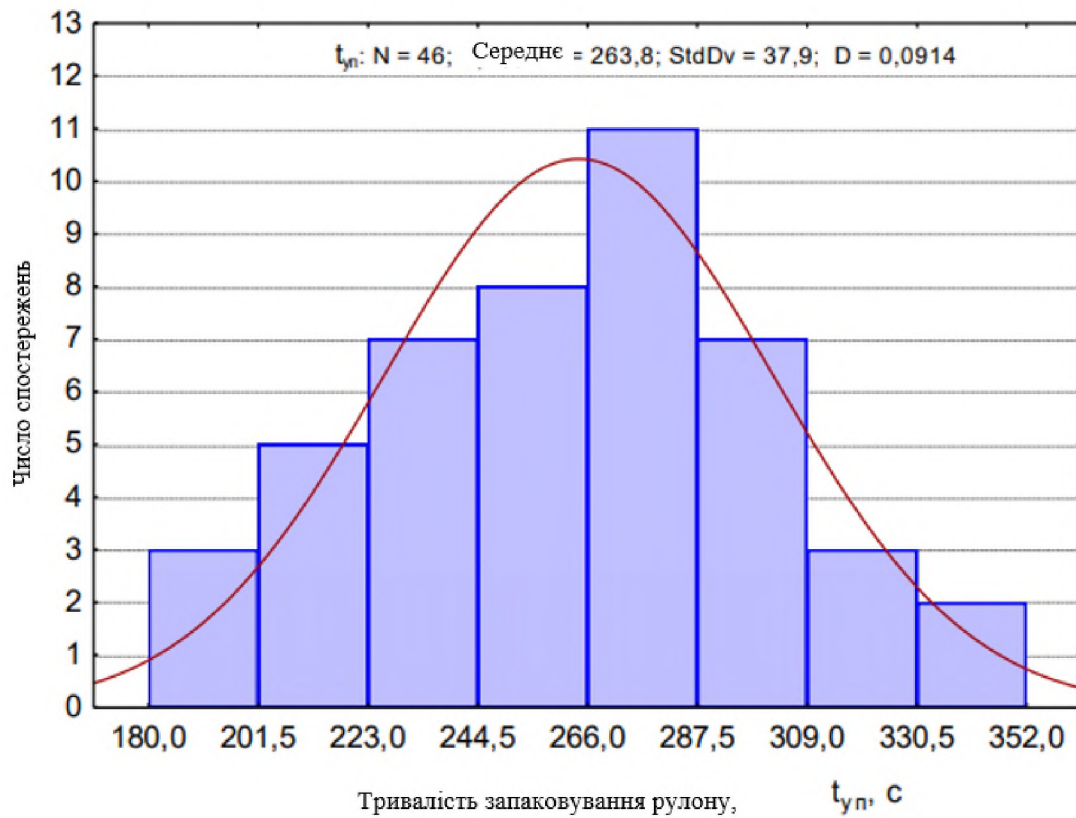


Рисунок 4.5 – Щільність розподілу тривалості індивідуальної обмотки рулонів сінажу

#### 4.4. Висновки до розділу 4

1. Отримана модель самонагрівання сінажу в рулоні та обґрунтовані допустимі проміжки в часі між формуванням рулону та його герметизацією, що дозволяє оптимізувати схему транспортного обслуговування кормозбирального процесу та роботу пакувальників рулонів у плівку.
2. Проведений аналіз одержаних статистичних даних показників роботи кормозбиральних машин дозволив зробити висновок про те, що при побудові ймовірнісної імітаційної моделі кормозбирального процесу для опису експлуатаційно-технологічних властивостей машин прийнятний нормальний закон розподілу. Параметри прийнятого теоретичного закону розподілу для кожного показника роботи машин визначено за результатами досліджень.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Аналіз досліджень, виконаних у галузі заготівлі кормів, показав, що ефективна технологія заготівлі кормів передбачає досить жорстку взаємодію окремих машин і всіх ланок, що беруть участь у процесі, з дотриманням технологічних вимог, з урахуванням властивостей оброблюваного матеріалу та впливів погодних умов. Досліджень щодо оцінки адаптивності та підвищення ефективності процесу заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку, що охоплюють весь комплекс робіт від скошування травостою до упаковки та укладання корму на зберігання, з урахуванням самонагрівання, з погляду, є недостатньо.
2. Запропонована функціональна модель процесу заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку, побудована за блочним принципом, здатна подальшого розвитку та постійного вдосконалення. Вона адаптована до змінних умов функціонування системи, легко пристосовується для вивчення подібних виробничих систем.
3. Запропоновано моделюючий алгоритм процесу заготівлі сінажу в рулонах, упакованих у плівку.
4. Для організації чіткої та ефективної роботи вантажних та транспортних засобів, зайнятих у процесі заготівлі сінажу в рулонах, запропоновано модель розподілу рулонів корму на полі.
5. Для проведення експериментальних досліджень використовувалось методика, що ґрунтувалась на числовому проведенні експериментальних досліджень. Були використані відомі та створено нові методики експериментальних досліджень.
6. Отримана модель самонагрівання сінажу в рулоні та обґрунтовані допустимі проміжки в часі між формуванням рулону та його герметизацією, що дозволяє оптимізувати схему транспортного обслуговування кормозбирального процесу та роботу пакувальників рулонів у плівку.
7. Проведений аналіз одержаних статистичних даних показників роботи кормозбиральних машин дозволив зробити висновок про те, що при побудові ймовірнісної імітаційної моделі кормозбирального процесу для опису

експлуатаційно-технологічних властивостей машин прийнятний нормальний закон розподілу. Параметри прийнятого теоретичного закону розподілу для кожного показника роботи машин визначено за результатами досліджень.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Сіно, сінаж та силос – особливості зберігання кормів?/ Технологія та годівля. URL: <https://tandf.in.ua/sino-sinazh-ta-sylos-osoblyvosti-zberihannya-kormiv/> . (дата звернення: 29.09.2023).
2. Оксана Бублик. Сіно і сінаж люцерни суттєво відрізняються за хімічним складом і поживністю/AgroTimes URL: <https://agrotimes.ua/tvarinnitstvo/sino-i-sinazh-lyuczerny-suttyevo-vidriznyayutsya-za-himichnym-skladom-i-pozhyvnistyuu/> . (дата звернення 12.10.2023).
3. Сироватко К.М. Ефективність використання сінажу із однорічної бобовозлакової сумішки в годівлі ремонтних телиць/ Аграрна наука та харчові технології. Годівля тварин та технологія кормів. Випуск 4(107), 2019.т. 1. С.50-57.
4. Гноєвий І.В. Ефективність застосування консервованих кормів за пріоритетними технологіями їх заготівлі в годівлі великої рогатої худоби. Агропромислове виробництво Полісся. 2013. Вип.6. С 122-124.
5. Ібатулін І.І., Башенко М.І., Жукорський О.М. Довідник з повноцінної годівлі сільськогосподарських тварин. Київ. Аграрна наука, 2016. С. 194-203.
6. Кандиба В.М. Стан і пріоритетні напрями розвитку науки про нормовану годівлю сільськогосподарських тварин в Україні. Ефективні корми та годівля. 2010. № 8. С. 8-11.
7. How to Make Haylage [Electronic resource] // Make-Haylage. - Saved from url: <https://www.wikihow.com/How-to-Make-Haylage>. 142. Wolf, J. Stabile Silagen aus dem Folienschlauch / J. Wolf // Neue Landwirtschaft. Sonderheft Mais. - 2001. – P. 100-102.
8. Haylage storage techniques [Electronic resource] // Agriculture-natural resources and industry. Saved from url: <http://www.saskatchewan.ca/business/agribusiness-farmers-and-ranchers>. 144. Kung, L. The effect of wide swathing on wilting times and nutritive value of alfalfa haylage / L. Kung, E.C. Stough, E.E. McDonell, R.J. Schmidt, M.W. Hofherr // Journal of Dairy Science. - 2010. - Т. 93. - № 4. - P. 1770-1773.
9. Zhortuylov, O. Analysis of haylage round bale wrapper operating mechanism / O. Zhortuylov, K. Kalym, B. Kassymbayev, D. Karaivanov // Life Science Journal. - 2013. -

- T. 10. - P. 349-352. 146. Rotz, C.A. Alfalfa drying model for the field environment / Rotz C.A. ,Chen Y// Trans. ASAE, - St. Joseph. Mish, 1985.- Vol 28. - №5. - P.1686-1691.
10. Naylor, T. Computer simulation experiments with models of economic systems / T. Naylor. – New york: John Wiley&sons, 1971.
11. Pritsker, A. Introduction to simulation and slam II / A. Pritsker.- Indiana: Systems Publishing Corporation West Labayett, 1984. 149. Shannon, R. Systems simulation the art and science / R. Shannon. - Huntsville: University of Alabama in Huntsville, New Jersey: Englewood Cliffs, 1975.
12. Hastings, N.A.J. Statistical Distributions / N.A.J. Hastings, B. Peacock , New York: John Wiley and Sons Ltd, 1993. – P. 192.
13. П. Трохимчук. ЗАГОТІВЛЯ СІНАЖУ. ЯК ОТРИМАТИ ЯКІСНИЙ КОРМ?// Тези ІІІ студентської науково-технічної конференції «Сучасні технології у агровиробництві та природокористуванні». Луцьк: Факультет аграрних технологій та екології, Луцький НТУ. - 2023. - с.32-34.