

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

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Морозов Олександр Вікторович

УДК 631.354.2:621.313.333

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РІЖУЧОГО
АПАРАТУ ЖАТКИ З ЛІНІЙНИМ АСИНХРОННИМ
ЕЛЕКТРОДВИГУНОМ**

208 “Агроінженерія”

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

_____ Морозов О.В.

Керівник роботи

Міненко С.В.

кандидат технічних наук, доцент

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Морозов Олександр Вікторович. Обґрунтування параметрів ріжучого апарату жатки з лінійним асинхронним електродвигуном. – *Кваліфікаційна робота на правах рукопису.*

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

У роботі обґрунтовано доцільність відмови від традиційних коливальних приводів ножових смуг жаток, застосування яких призводить до ускладнення конструкції технологічних машин, зниження їх надійності та погіршення техніко-експлуатаційних показників. Запропоновано конструкцію приводу ріжучого апарату жатки на базі плоского лінійного асинхронного електродвигуна зі схемою комутації, що забезпечує роботу двоножового ріжучого апарату як з одинарним, так і з подвійним ходом ножових смуг.

На основі розробленої математичної моделі електроприводу двоножового ріжучого апарату обґрунтовано параметри, за яких досягаються раціональні енергетичні та технологічні показники його роботи. Доведено можливість збільшення швидкості руху ножових смуг у 1,4 раза, що забезпечує підвищення продуктивності жатки. Досліджено залежність швидкості руху ножової смуги від величини її переміщення та визначено оптимальні амплітуди коливань: 38,1 мм для одинарного ходу та 76,2 мм для подвійного ходу за критерієм максимуму швидкості.

Запроектовано й виготовлено дослідні зразки коливального лінійного асинхронного електроприводу двоножового ріжучого апарату жатки на базі плоского лінійного асинхронного двигуна з можливістю регулювання параметрів і роботи в режимах вимушених коливань та автоколивань. Експериментальні дослідження підтвердили адекватність розробленої математичної моделі: похибка вимірювання положення ножових смуг не перевищує 9,8 %, а струму, споживаного лінійним асинхронним двигуном, – 8,5 %, що дозволяє використовувати модель у практичних інженерних розрахунках.

Ключові слова: жатка, ріжучий апарат, двоножовий ріжучий апарат, лінійний асинхронний електродвигун, електропривод, ножова смуга, коливальний рух, швидкість різання, амплітуда коливань, продуктивність жатки, математична модель, експериментальні дослідження.

ANNOTATION

Morozov Oleksandr Viktorovich. Justification of the Parameters of a Header Cutting Apparatus with a Linear Induction Motor. – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 Agricultural Engineering. – Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

The study substantiates the feasibility of abandoning traditional oscillating drives of header knife sections, the use of which inevitably leads to increased complexity of technological machines, reduced reliability, and deterioration of their technical and operational performance. A design of a header cutting apparatus drive based on a flat linear induction motor with a commutation scheme is proposed, which ensures the operation of a double-knife cutting apparatus with both single and double knife strokes.

Based on the developed mathematical model of the electric drive of the double-knife cutting apparatus, the parameters that provide rational energy and technological performance have been justified. The possibility of increasing the knife section velocity by 1.4 times has been proven, which makes it possible to increase the productivity of the header. The dependence of the knife section velocity on its displacement has been investigated, and optimal oscillation amplitudes have been determined according to the criterion of maximum velocity: 38.1 mm for a single knife stroke and 76.2 mm for a double knife stroke.

Experimental prototypes of an oscillatory linear induction electric drive for a double-knife header cutting apparatus based on a flat linear induction motor have been designed and manufactured, with the capability of parameter adjustment and operation in forced oscillation and self-oscillation modes. Experimental studies confirmed the adequacy of the developed mathematical model: the measurement error of the knife section position does not exceed 9.8%, and the error in measuring the current consumed by the linear induction motor does not exceed 8.5%, which allows the obtained experimental dependences to be considered sufficiently accurate and consistent with theoretical research data, and the developed mathematical model to be used in practical engineering calculations.

Keywords: header, cutting apparatus, double-knife cutting apparatus, linear induction motor, electric drive, knife section, oscillatory motion, cutting speed, oscillation amplitude, header productivity, mathematical model, experimental studies.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	9
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ДВОНОЖОВОГО РІЖУЧОГО АПАРАТУ.....	22
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЙНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ДВОНОЖОВОГО РІЗАЛЬНОГО АПАРАТУ ЖАТКИ....	27
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	39
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	40

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Сучасний етап розвитку сільськогосподарського машинобудування характеризується підвищеними вимогами до продуктивності, енергоефективності та надійності збиральної техніки. В умовах інтенсифікації рослинництва, зростання вартості паливно-енергетичних ресурсів і дефіциту трудових ресурсів особливої актуальності набуває удосконалення робочих органів зернозбиральних машин, зокрема ріжучих апаратів жаток, які значною мірою визначають якість і ефективність процесу збирання врожаю.

Традиційні ріжучі апарати жаток з кривошипно-шатунним або ексцентриковим приводом мають низку суттєвих недоліків, серед яких значні інерційні навантаження, підвищений рівень вібрацій, обмеження швидкісних режимів роботи та інтенсивний знос елементів приводу. Зазначені фактори негативно впливають на довговічність вузлів, стабільність роботи машини та призводять до зростання експлуатаційних витрат і втрат зерна під час збирання.

Перспективним напрямом розвитку конструкцій ріжучих апаратів жаток є застосування електричного приводу з використанням лінійного асинхронного електродвигуна, який забезпечує безпосередній поступальний рух різального ножа без проміжних механічних перетворювачів. Такий підхід дає змогу істотно знизити масу та складність приводу, мінімізувати вібраційні навантаження, підвищити точність керування режимами різання та створити передумови для адаптивної роботи жатки залежно від умов збирання.

Водночас впровадження лінійних асинхронних електродвигунів у конструкцію ріжучих апаратів потребує науково обґрунтованого вибору їх параметрів, узгоджених з кінематичними, силовими та енергетичними характеристиками процесу різання стебел сільськогосподарських культур. Недостатня вивченість питань взаємодії електромагнітного приводу з різальним апаратом, а також відсутність універсальних рекомендацій щодо параметрів

такого приводу обмежують практичне впровадження зазначених технічних рішень.

У зв'язку з цим обґрунтування параметрів ріжучого апарату жатки з лінійним асинхронним електродвигуном є актуальним науково-прикладним завданням, спрямованим на підвищення ефективності, надійності та енергоощадності збиральних машин, що має важливе значення для розвитку сучасного агропромислового виробництва.

Метою магістерської роботи є обґрунтування параметрів ріжучого апарату жатки з лінійним асинхронним електродвигуном з метою підвищення продуктивності, енергоефективності та надійності процесу різання шляхом зменшення складності конструкції приводу та оптимізації режимів руху ножових смуг.

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно вирішити такі основні **завдання:**

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі основні завдання:

Проаналізувати існуючі конструкції та принципи дії приводів ріжучих апаратів жаток і визначити їх основні недоліки.

Обґрунтувати доцільність застосування лінійного асинхронного електродвигуна як приводу ріжучого апарату жатки.

Розробити конструктивну схему електроприводу двоножового ріжучого апарату на базі плоского лінійного асинхронного двигуна.

Побудувати математичну модель електроприводу ріжучого апарату та дослідити її роботу в режимах вимушених коливань і автоколивань.

Визначити раціональні параметри електроприводу, що забезпечують оптимальні енергетичні та технологічні показники роботи ріжучого апарату.

Спроекувати та виготовити дослідні зразки лінійного асинхронного електроприводу ріжучого апарату жатки.

Об'єктом дослідження: процес функціонування ріжучого апарату жатки зернозбиральної машини під час збирання зернових культур.

Предмет дослідження: електромеханічні, кінематичні та енергетичні характеристики ріжучого апарату жатки з двоножовою схемою, оснащеного лінійним асинхронним електроприводом, а також закономірності руху ножових смуг у режимах одинарного та подвійного ходу.

Методи дослідження. Під час виконання магістерської роботи використано комплекс теоретичних, експериментальних і розрахунково-аналітичних методів дослідження. Теоретичні дослідження ґрунтувалися на методах аналізу й синтезу електромеханічних систем, теорії електричних машин, теорії коливань та основах механіки. Для опису процесів руху ножових смуг і роботи електроприводу застосовано методи математичного моделювання з використанням диференціальних рівнянь, що дозволило дослідити динамічні та енергетичні характеристики ріжучого апарату.

Розрахунково-аналітичні методи використовувалися для обґрунтування конструктивних і режимних параметрів лінійного асинхронного електродвигуна, визначення швидкості руху ножових смуг, амплітуд коливань та оцінювання енергетичних показників приводу. Для перевірки адекватності теоретичних положень проведено експериментальні дослідження на спеціально спроектованих і виготовлених дослідних зразках коливального лінійного асинхронного електроприводу двоножового ріжучого апарату жатки.

Обробку експериментальних даних виконано з використанням методів математичної статистики та похибок вимірювання, що дало змогу оцінити точність результатів і встановити відповідність експериментальних залежностей даним теоретичних досліджень.

Перелік **публікацій** за темою роботи:

1. Міненко С.В., Морозов О.В. Опис експериментального зразка приводу двоножового ріжучого апарату з двостороннім плоским лінійним асинхронним двигуном. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції

"Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2025 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. С. 324-328.

2. Міненко С., Морозов О. Компонування жатки з лінійним електроприводом за місцем розташування двостороннього плоского лінійного асинхронного двигуна. Сучасні технології та технічний сервіс: виклики і можливості: збірник матеріалів I Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Кам'янець-Подільський, 16 жовтня 2025 року). Кам'янець-Подільський: Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», 2025. С. 106-110.

2. Морозов О.В. Кінематична схема лінійного електропривода двоножового ріжучого апарата. Наукові читання – 2025: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками I-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 23 квітня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. Том 2. С. 74-75.

Практичне значення магістерської роботи полягає у можливості використання отриманих наукових і технічних результатів під час проєктування та модернізації ріжучих апаратів жаток зернозбиральних машин. Запропонована конструкція електроприводу на базі плоского лінійного асинхронного електродвигуна дозволяє зменшити конструктивну складність приводу, підвищити надійність роботи ріжучого апарату та покращити його техніко-експлуатаційні показники.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 28 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 42 сторінки комп'ютерного тексту, містить 32 рисунки.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Агротехнічні вимоги до збирання зернових культур

Збирання зернових – вирішальний етап, що визначає збереження врожаю і якість зерна. Воно має проводитися за оптимальних погодних умов – сухих, теплих, без дощу і сильного вітру. Надмірні опади підвищують вологість зерна, збільшуючи витрати на сушіння і погіршуючи якість. З іншого боку, надмірна спека ($+30^{\circ}\text{C}$ і більше) з низькою вологістю повітря перетворює соломку на крихку, роблячи зерно дуже сухим і крихким. Для збирання вважають оптимальною температуру повітря $+20\dots+25^{\circ}\text{C}$, при якій вологість зерна знижується поступово до безпечних значень. Бажано уникати найспекотніших годин доби: особливо на пшениці твердій, яка при цьому надзвичайно крихка.

Строки збирання визначають фазу стиглості й вологості зерна. Зернові культури збирають у фазі повної стиглості: у цей час сходять кінцеві показники клейковини й білку, а вологість зерна опускається до безпечних $\approx 14\text{--}18\%$. Так, збирання пшениці озимої починають, коли вологість зерна не перевищує $\approx 17\%$, а при прямому комбайнуванні – вже на 95% стиглості і вологість не більше 16–17%. Надто ранній збір (з вологістю понад $\approx 18\%$) призводить до великих втрат: зерно липке, погано обсіпається, ускладнюється молотіння і обростання домішками. Надто пізні збирання, навпаки, збільшують природні втрати (осипання зерна, вилягання стебел, пожовтіння соломи). Затримка збирання навіть на 5 діб може збільшити втрати урожаєм на 1–2%, а за 20 діб – призводить до стрімкого зростання втрат (у деяких випадках пшениці до 60% базового врожаю).

Вологість зерна при зборі має великий вплив на якість і втрати. Занадто вологе зерно (понад 15–18%) важко досушувати і воно більше пошкоджується під час обмолоту. Натомість занадто сухе (нижче $\approx 12\text{--}13\%$) дуже крихке – збільшуються поламани зерно і втрати на скиді комбайна. Наприклад, зерно з

вологою понад 15% “пропускається” агрегатом і є внутрішні втрати, а при вологості менше 13% безпосередньо на ріжучому апараті відбувається миттєве роздавлювання й поломка зерен. Стандартні контракти на пшеницю допускають не більше 4% подрібнених зерен, 2% пророслих і 2% домішо. Після обмолоту зерно необхідно досушити до безпечної вологості для зберігання (для пшениці, жита, ячменю – не більше 14%, а бажано 12–13% для довгострокового зберігання).

Сучасні зернозбиральні комбайни дозволяють проводити збір двома основними способами. Пряме комбайнування (однофазове збиральництво) – передбачає одночасне скошування і обмолот при вологості зерна близько 12–16%. Цей метод найефективніший на чистих, рівномірно достиглих полях із міцними стеблами. Роздільне (двофазове) збирання включає спочатку скошування валками на стадії воскової стиглості (зерно 25–35% вологості), а після підсихання – обмолот. Такий метод застосовують на нерівномірно достиглих або вилягаючих посівах. На великих площах іноді використовують трьохфазну технологію, додаючи проміжне чищення зерна та окреме збирання соломи.

Комплектація техніки також впливає на якість. Сучасні комбайни оснащені автоматичними регулюваннями – моніторами втрат, сенсорами вологості, GPS-навігацією, системами автоматичної чистки і регулювання молотильно-сепаруючого апарата. Це дозволяє оператору оперативно коригувати швидкість руху та налаштування машини, мінімізуючи втрати та брак. Наприклад, монітор втрат підкаже зменшити швидкість чи змінити подачу маси. Такі технології разом із ретельним обслуговуванням комбайна (чистка, перевірка сіт, налаштування молотильного барабана та сепараторів) забезпечують збір зерна з мінімальним пошкодженням і домішками.

У галузевих стандартах втрати під час збирання зернових культур не повинні перевищувати 2–3% від врожаю. На практиці навіть 1–2% втрат вважають високоефективним результатом: зменшити їх у полі важко, адже деяка

частина зерна завжди залишається під молотилом або обсипається природно. Згідно з дослідженнями, неправильна організація збирання може суттєво підвищувати втрати: порушення оптимальних строків дає додаткових 6,6% втрат, невідрегульована техніка – 4,5%, невдала комбінація методів – 4,0%. В сумі таке «непорозуміння» технології дає майже 17% зайвих втрат. Тому головне в збиральній кампанії – дотримання агротехнічних регламентів: збір у фазу стиглості, правильне налаштування комбайна і чисті поля.

Передзбиральні агротехнічні заходи прямо впливають на кінцеву якість зерна. Зокрема, густина посіву має бути оптимальною: надмірно загущені посіви призводять до осипання і полеглої стеблостою, що погіршує якість і вимагає роздільного збирання. Надто розріджені – формують дрібніше зерно з меншим вмістом клейковини. Баланс живлення, особливо азоту, важливий для однорідного досягання: надлишок азоту може розтягувати фазу досягання і збільшувати ризик осипання. Для посиленого стеблостою використовують ретарданти – регулятори росту, які скорочують міжвузля і зменшують висоту стебла, підвищуючи стійкість до вилягання. Це дозволяє краще витримати культуру до збору, уникнути полеглості і випадання зерна під час обмолоту.

Крім того, захист від бур'янів і шкідників забезпечує чистоту зерна. Контроль бур'янів зменшує домішки сторонніх рослин у врожаї (такі «чужорідні» зерна зараховують до допустимих 2% імпуритетів у стандартній пшениці). Вчасна боротьба з хворобами (особливо кореневими, плямистостями колосу) покращує здоров'я рослин і якість насіння. Передзбиральна сівозміна та підготовка ґрунту також відіграють роль: вирівняне поле з однотипними попередниками дає рівномірнішу стиглість.

Отже, для отримання високоякісного зерна потрібно поєднати правильні строки й умови збирання з дотриманням агротехнології впродовж вегетації. При такому підході механізоване збирання забезпечить низькі втрати (1–3% урожаю), високу чистоту зерна та відповідну контрактним вимогам якість.

1.2 Типи приводних механізмів РА жаток сільськогосподарських машин

Привід ножа [15, 18] у більшості збиральних машин здійснюється кривошипно-шатунним механізмом, причому у зернозбиральних машин механізм приводу зазвичай плоский (рис. 1.1, а), а у косарок - просторовий (рис. 1.1, б). Просторовий механізм застосовується переважно у косарок через рухливість пальцевого бруса відносно верхньої рами косарки.

Знаходять також застосування механізми з хиткою шайбою, хитким валом, хитким водилом і колінчастим водилом (коромислом).

Механізм з хиткою шайбою (рис 1.1, в) застосовувався в рядкових жатках. Тут обертання вала *A* за допомогою хиткої шайби *B* перетворюється на коливальний рух вала *C*. З валом *C* жорстко пов'язаний коливач *D*, який своїм кінцем з'єднаний через короткий шатун *E* з ножем.

Механізм з хитним валом (рис. 1.6, г) застосовується у косарок при передачі руху на ніж фронтального апарату. Тут вал *C* за допомогою довгого шатуна *B* приводиться в коливання від кривошипного вала *A*. Від вала *C* через коливальний механізм і короткий шатун ніж приводиться в зворотно-поступальний рух. Передача руху від кривошипного вала гойдальним водилом (рис. 1.1, д і е) здійснюється у самохідних зернозбиральних комбайнів, силосозбиральних комбайнів та інших машин.

Кривошипно-шатунний механізм буває центральним (аксіальним), коли вісь кривошипного вала лежить на лінії руху ножа, і зміщеним (дезаксіальним), коли вісь кривошипного вала лежить вище лінії руху ножа на деяку величину.

В даний час для отримання зворотно-поступального руху ріжучого полотна в комбайнах застосовують в основному 2 типи механізмів - хитної шайби (МКШ) і планетарного типу (МПТ). До них практично у всіх комбайнах застосовувалися кривошипно-шатунні механізми. Всі ці механізми перетворюють обертальний рух у зворотно- поступальний.

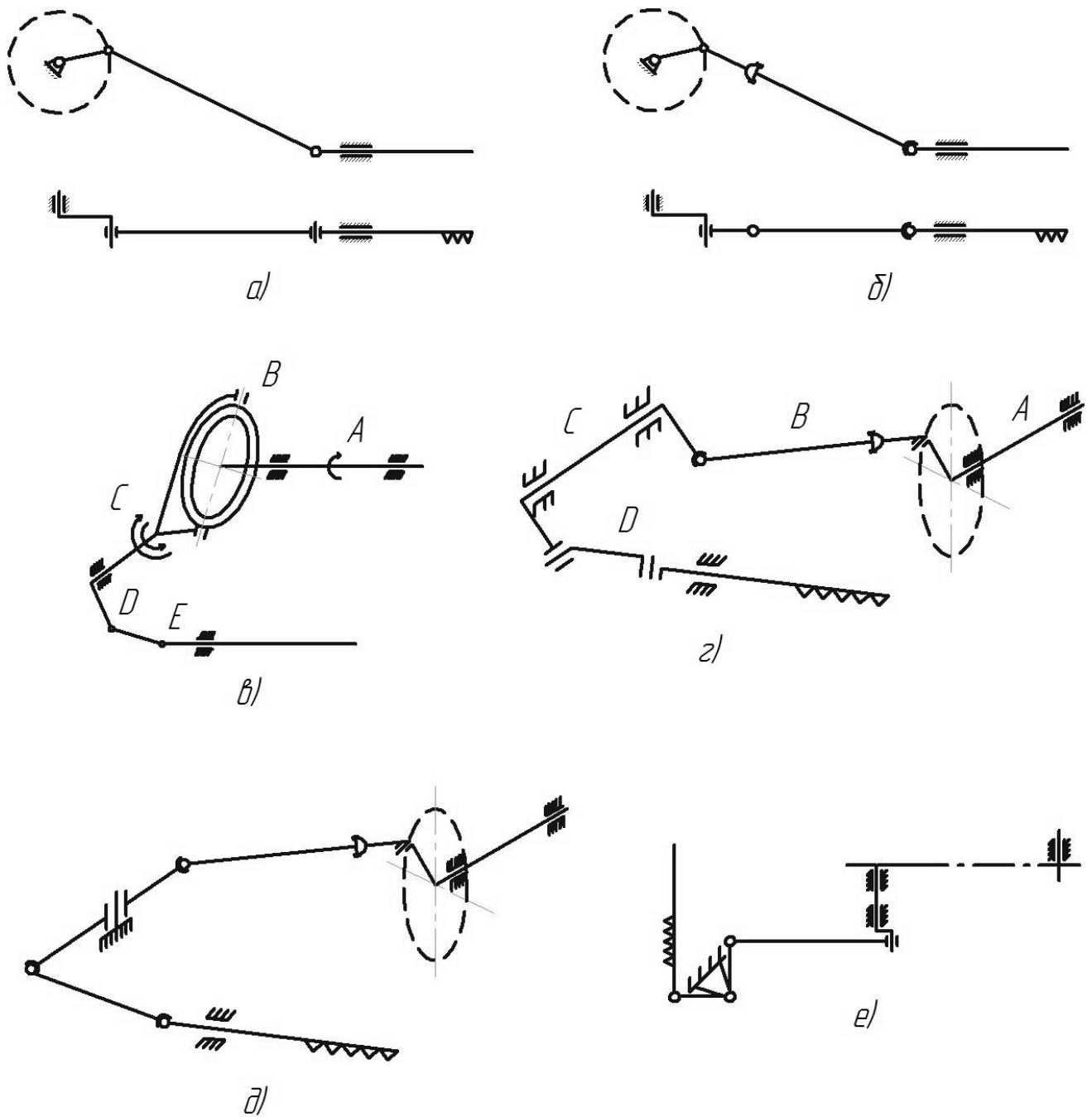


Рис. 1.1. Типи приводів ріжучих апаратів жаток збиральних машин: а – плоский; б – просторовий; в – механізм з коливною шайбою; г – механізм з коливним валом; д, е – механізм від кривошипного вала з коливним водилом.

На рис. 1.2. представлені зовнішні види МКШ і МПТ.

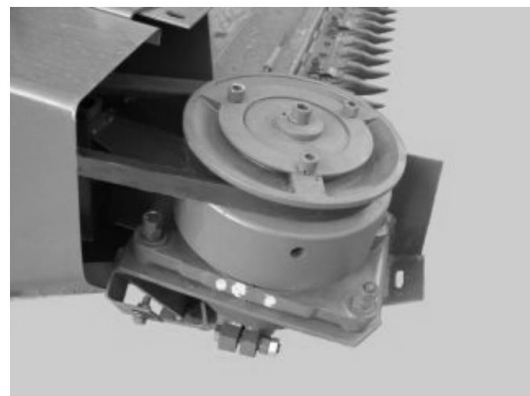
Привід планетарного типу є більш досконалим - у його важеля відсутні вертикальні переміщення, що дозволяє не навантажувати ніж, тим самим продовжуючи тривалість роботи ножа в 3 рази. Також привід планетарного типу забезпечує більш високу швидкість ріжучого полотна.

Схеми кривошипно-шатунних механізмів приводу ножів зображені на рис.

1.3.

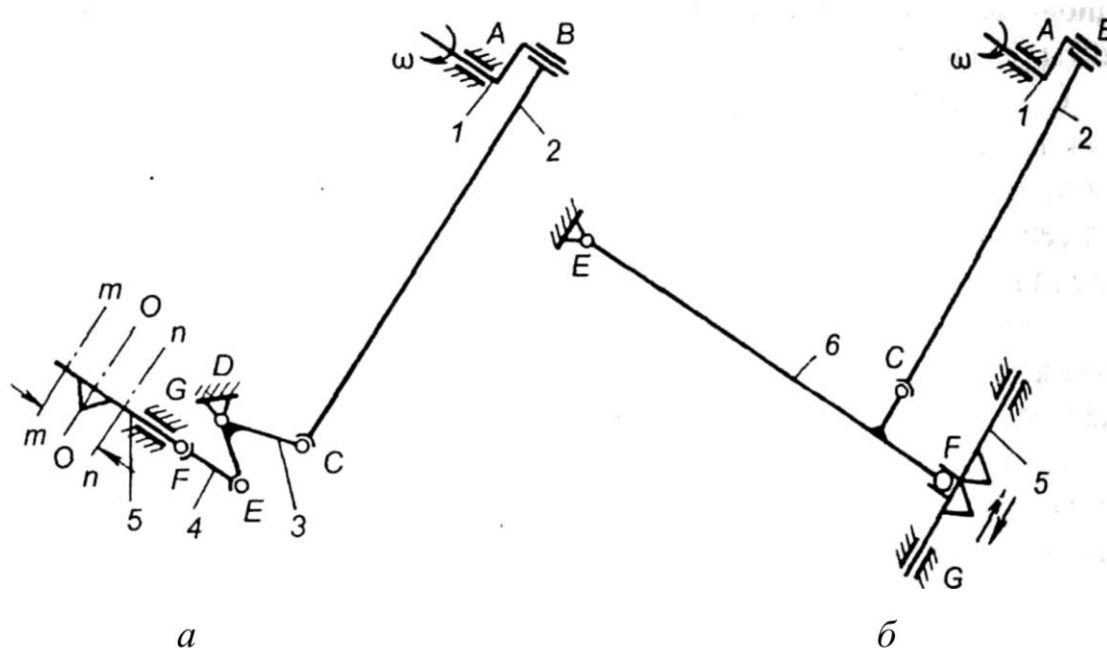


а)



б)

Рис. 1.2. Зовнішній вигляд приводів ріжучих апаратів, що застосовуються в жатках зернозбиральних машин: а – МКШ; б – МПТ.



а

б

Рис. 1.3. Схеми кривошипно-шатунних механізмів приводу: а – з коромислом; б – з водилом; 1 – кривошип; 2 – шатун; 3 – коромисло; 4 – сполуч на ланка; 5 – ніж; 6 – водило

У зернових жатках найчастіше використовували механізм з коромислом (рис. 1.3, а). Механізм з водилом (рис. 1.3, б) зазвичай використовують у валкових жатках для зернобобових культур.

Кривошипно-шатунні приводи ножа поступово витіснилися механізмом хитної шайби (рис. 1.4).

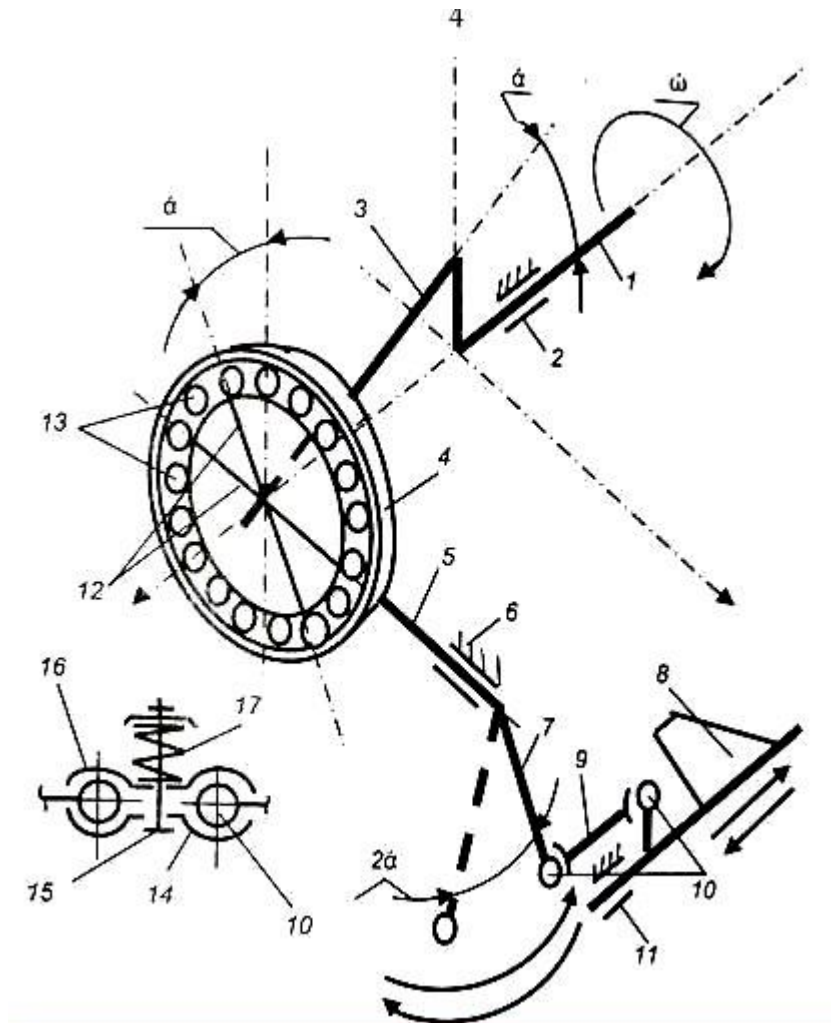


Рис. 1.4. Принципова схема механізму коливної шайби: 1 – ведучий вал; 2,6 - корпус; 3 – коліно ведучого вала; 4 – обичайка; 5 – вал ведений; 7 – водило; 8 – ніж; 9 – ланка сполучна; 10 – кульові шарніри; 11 – напрямна головки ножа; 12 – шайба; 13 – підшипник кочення; 14, 16 – щічки; 15 – болт стяжний; 17 – пружина.

Привід планетарного типу (рис. 1.5) кінематично найбільш досконалий, оскільки повністю розвантажує головку ножа, як від поперечних, так і від вертикальних навантажень. Принцип його роботи заснований на загальновідомому в теорії механізмів і машин ефекті.

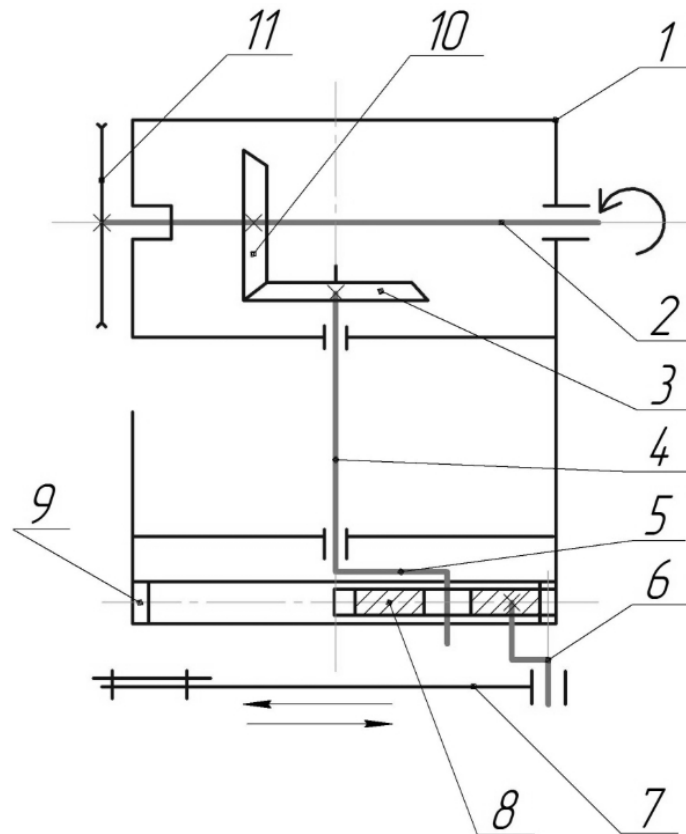


Рис. 1.5. Привід ножа планетарного типу: 1 – корпус; 2 – вал ведучий; 3, 10 – конічна передача; 4 – вал ведений; 5 – водій; 6 – цапфа; 7 – ніж; 8 – сателіт; 9 – шестерня корончата; 11 – шків приводний

Розглянуті механічні приводи ріжучих апаратів жаток зернозбиральних комбайнів досить добре працюють для сегментно-пальцевих ріжучих апаратів.

Приведення в рух безпальцевого ріжучого апарату з двома рухомими ножами такими приводами значно ускладнено, оскільки привід виходить складним через велику кількість кінематичних ланок і можливу їх поломку, металоємність приводу значно збільшується, наявність опозитно-обертових валів призводить до зайвої вібронавантаженості жатки комбайна. Через часті поломки і наведені вище недоліки традиційних приводів ріжучих апаратів жаток комбайнів, двоножові апарати знайшли вузьке застосування, хоча безпальцеві ріжучі апарати, особливо з двома рухомими ножами, оптимально підходять для збирання повалених зернових і зернобобових культур, оскільки при цьому значно зменшується забивання ріжучого апарату і забезпечується якісний зріз

при високій швидкості збирання. Безпальцевий різальний апарат дозволяє проводити збирання культур на підвищених швидкостях.

Пропонується при збиранні полеглих зернових культур використовувати в жатках комбайнів двоножовий різучий апарат (ДРА), оснащений простим приводом на основі двостороннього плоского лінійного асинхронного двигуна (ДПЛАД), що виключає наявність зайвих механічних ланок, як один із способів підвищення ефективності роботи різучого апарату. ДПЛАД перетворює електроенергію, що підводиться до нього, безпосередньо в поступальний рух його вторинного елемента, тим самим виключаючи механічний перетворювач виду руху (МПВР).

1.3. Варіанти компоновання жатки з лінійним електроприводом за місцем розташування двостороннього плоского лінійного асинхронного двигуна (ДПЛАД).

Спрощення конструкції приводу двоножового різучого апарату (ДРА) жатки шляхом усунення зайвих кінематичних ланок передачі та підвищення ефективності роботи приводу досягаються у технічних рішеннях, схеми яких наведені нижче [2].

На рис. 1.6 представлено варіант реалізації приводу ДРА із тильним розташуванням приводних ДПЛАД відносно ДРА [2].

До переваг цієї конструкції належить зручне розташування ДПЛАД відносно ДРА – вони винесені з робочої зони, що не заважає процесу скошування культур. Також передбачена можливість регулювання амплітуди коливань і зусилля ДПЛАД шляхом зміни довжини плеч шарнірів [2].

До недоліків цієї конструкції належить наявність шарнірно-важільних систем, що знижує надійність приводу [2].

Розглянемо роботу електроприводу різучого апарату жатки з тильним розташуванням ДПЛАД [2].

Ріжучий апарат містить дві рухомі ножові смуги 7 і 8 із сегментами, що рухаються назустріч одна одній. Привід кожної ножової смуги здійснюється від власного ДПЛАД (позиції 1 і 2), верхні 11 і нижні 13 індуктори кожного з яких закріплені в корпусі, жорстко приєднаному до жатки комбайна, та охоплюють вторинний елемент 12. Вторинні елементи кожного ДПЛАД, у свою чергу, через шарнірно-важільні системи 3...6 з'єднуються з ножовими смугами 7 і 8 [2].

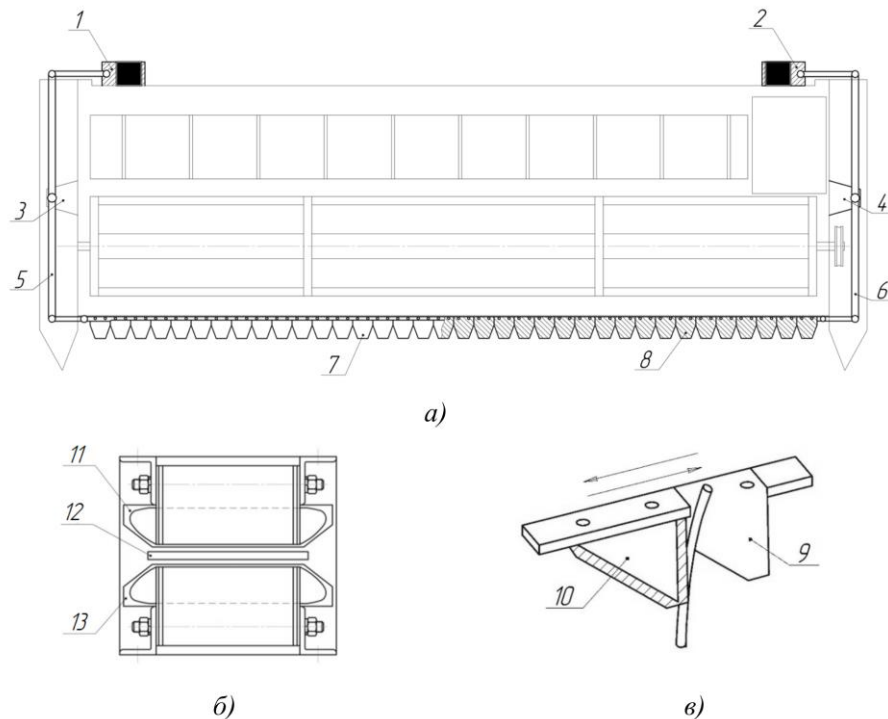


Рис. 1.6. Жатка з тильним розташуванням приводних ДПЛАД: а – компоновання елементів жатки з тильним розташуванням ДПЛАД і приводом ДРА на основі важелів із шарнірами (вигляд зверху); б – конструкція приводного ПЛАД; в – рух ножових смуг у ріжучому апараті; 1, 2 – лінійні асинхронні двигуни приводу ножових смуг; 3, 4 – нерухомі опори шарнірно-важільної системи приводу ножових смуг; 5, 6 – шарнірно-важільні системи приводу ножових смуг; 7 – верхня ножова смуга РА; 8 – нижня ножова смуга РА; 9 – сегмент нижньої ножової смуги; 10 – сегмент верхньої ножової смуги; 11 – верхній індуктор ДПЛАД; 12 – вторинний елемент ДПЛАД; 13 – нижній індуктор ДПЛАД [2].

Вторинний елемент 12 кожного з двигунів переміщується у фторопластових підшипниках ковзання, закріплених у спільному з індукторами

корпусі. Індуктори 11 і 12 можуть переміщуватися у вертикальному напрямку за допомогою регулювальних болтів, завдяки чому під час експлуатації забезпечується налаштування оптимального повітряного зазору ДПЛАД [2].

Протилежні від вторинних елементів частини ножових смуг під час руху спираються на пружні елементи (на кресленні не показані), жорсткість яких можна регулювати зміною їхньої довжини. Рух ножових смуг є опозитним [2].

Привід ріжучого апарата жатки з заднім розташуванням ДПЛАД працює таким чином. Під час підключення двостороннього ДПЛАД верхньої ножової смуги 7 до трифазної системи живлення електричний струм в індукторах 11 і 13 створює бігуче магнітне поле. Співнаправлені магнітні поля у верхньому та нижньому індукторах 11 і 13, взаємодіючи зі струмами, індуктованими в замкненому контурі вторинного елемента 12, викликають появу електромагнітних сил і переміщення вторинного елемента 12, а отже, і ножової смуги 7 у горизонтальному напрямку відносно індукторів ДПЛАД і корпуса жатки – у напрямку дії електромагнітних сил [2].

У процесі руху вторинного елемента відбувається деформація пружних елементів, установлених між ножовою смугою та корпусом жатки. До моменту повного стиснення пружних елементів здійснюється відключення ДПЛАД від мережі. Під дією потенціальної енергії, накопиченої у стиснених пружних елементах, ножова смуга 9 починає рух у зворотному напрямку. У міру руху ножової смуги пружні елементи повертаються у вихідний стан, після чого відбувається повторне підключення ДПЛАД до джерела живлення. Процес повторюється. Робота ДПЛАД нижньої смуги 10 аналогічна роботі верхньої 10, з тією різницею, що ці ДПЛАД працюють у протифазі, створюючи таким чином зустрічний рух смуг [2].

Додатково слід зазначити, що виконання частин індуктора з кількістю пар полюсів менше ніж чотири призводить до посилення крайових ефектів у ДПЛАД. Крайові ефекти проявляються у вигляді накладання на основну електромагнітну силу, яку створює двигун і яка приводить у рух ножові смуги,

додаткової змінної високочастотної сили з частотою, удвічі більшою за частоту змінного струму джерела живлення. Це сприяє підвищенню ефективності процесу різання ножовими смугами: зменшується зусилля різання та знос ріжучих крайок ножових смуг [2].

На рис. 1.7 представлено варіант реалізації приводу ДРА з боковим розташуванням приводних ДПЛАД відносно ДРА [2].

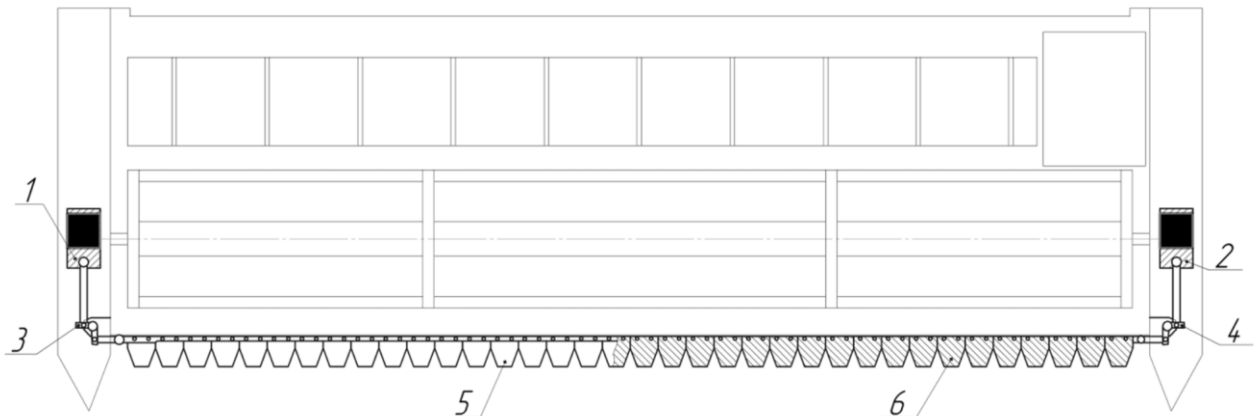


Рис. 1.7. Жатка з боковим розташуванням приводних ДПЛАД: 1 – ДПЛАД приводу верхньої ножевої смуги; 2 – ДПЛАД приводу нижньої ножевої смуги; 3 – коромисло приводу верхньої ножевої смуги РА; 4 – коромисло приводу нижньої ножевої смуги РА; 5 – верхня ножева смуга РА; 6 – нижня ножева смуга РА [2].

До переваг цієї конструкції належить зручне розташування ДПЛАД відносно ДРА — вони винесені із робочої зони вбік жатки, завдяки чому не перешкоджають процесу скошування культур. Також конструкція передбачає можливість модернізації наявних приводів жаток із коромислами шляхом заміни існуючого приводу на ДПЛАД. До недоліків цієї конструкції належить наявність коромисел, що змінюють напрямок руху на 90° і можуть спричинити появу додаткових навантажень на п'ятку ножевої смуги [2].

Конструкція цього лінійного електроприводу ДРА працює аналогічно до конструкції, наведеної на рис. 1.7 [2].

На рис. 1.8 представлено варіант реалізації приводу ДРА з фронтальним розташуванням приводних ДПЛАД відносно ДРА [2].

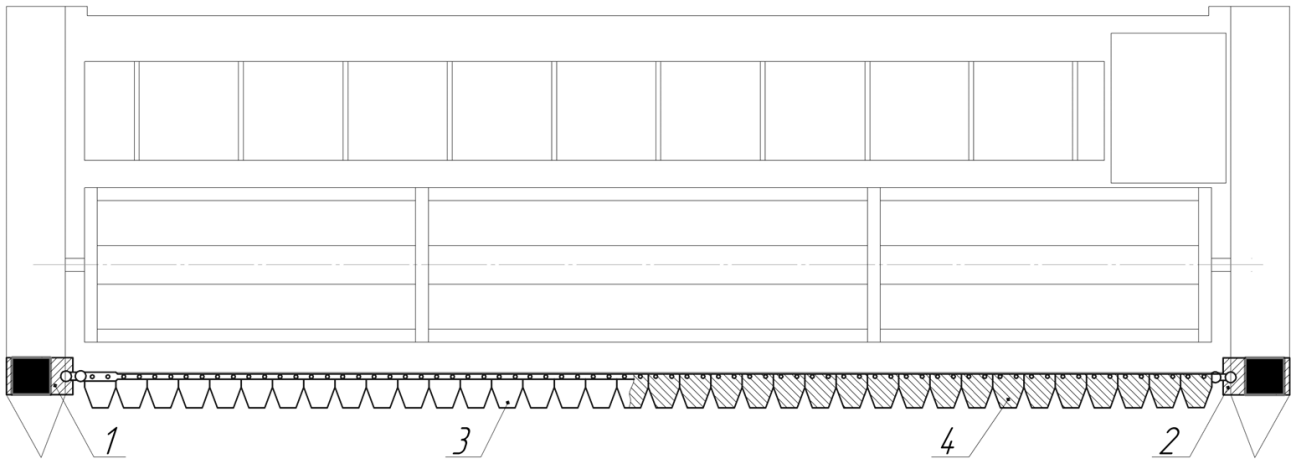


Рис. 1.8. Жатка з фронтальним розташуванням приводних ДПЛАД: 1 – ДПЛАД, який приводить у дію верхню ножову смугу; 2 – ДПЛАД, що забезпечує рух нижньої ножової смуги; 3 – верхня ножова смуга ріжучого апарата; 4 – нижня ножова смуга ріжучого апарата [2].

Основною перевагою цієї конструкції є те, що привідні ДПЛАД розташовані безпосередньо біля ножових смуг ріжучого апарата, завдяки чому вторинний елемент двигуна фактично є продовженням ножової смуги. Таким чином, робочий орган ріжучого апарата об'єднано з вторинним елементом ДПЛАД в єдину систему, що дозволяє майже повністю усунути проміжні кінематичні ланки та зменшити навантаження на п'ятку ножової смуги до мінімуму [2].

Недоліком цієї схеми є необхідність розташування ДПЛАД у робочій зоні жатки, що ускладнює їх монтаж і потребує ретельного розміщення для запобігання перешкодам під час скошування культур [2].

Для практичної реалізації було обрано конструкцію приводу ріжучого апарата з фронтальним розташуванням ДПЛАД [2].

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ДВОНОЖОВОГО РІЖУЧОГО АПАРАТУ

2.1. Кінематична схема лінійного електропривода двоножового ріжучого апарата

Кінематична схема лінійного електропривода двоножового ріжучого апарата жатки комбайна на базі двостороннього плоского лінійного асинхронного двигуна (ДПЛАД) представлена на рис. 2.1 [3].

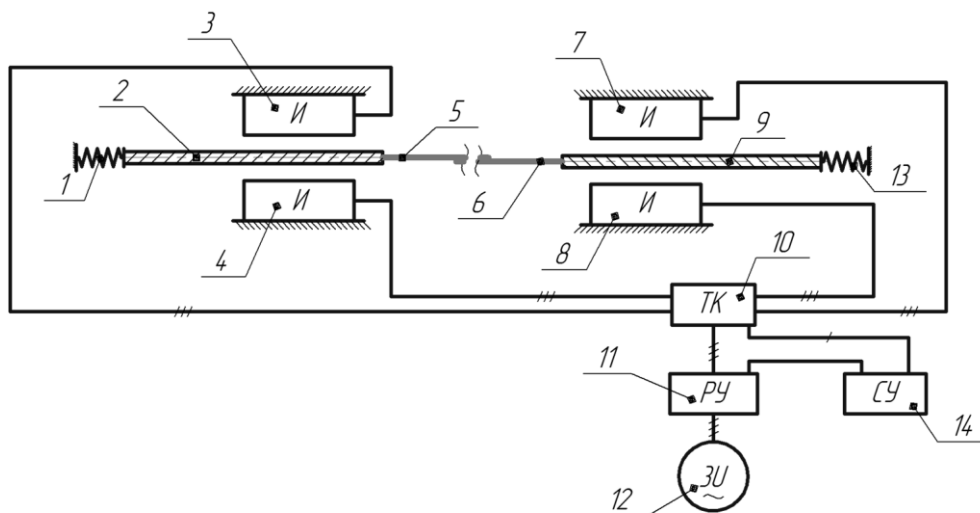


Рис. 2.1. Кінематична схема коливального лінійного асинхронного електропривода (КЛАЕП) ріжучого апарата жатки комбайна на основі ДПЛАД: 1, 13 – пружні елементи ножових смуг; 2 – вторинний елемент ДПЛАД верхньої ножової смуги; 3, 4 – верхній і нижній індуктори двостороннього ДПЛАД верхньої ножової смуги; 5, 6 – верхня і нижня ножові смуги; 7, 8 – верхній і нижній індуктори двостороннього ДПЛАД нижньої ножової смуги; 9 – вторинний елемент ДПЛАД нижньої ножової смуги; 10 – тиристорний комутатор; 11 – стабілізуючий розподільчий пристрій трифазної змінної напруги; 12 – синхронний генератор; 14 – блок системи керування роботою тиристорного комутатора [3].

Система живлення електропривода ДРА жатки формується силовим трифазним синхронним генератором 12 потужністю 15 кВт, який через електромагнітну муфту з'єднаний із колінчастим валом дизельного двигуна збиральної машини. Трифазна напруга стабілізується у розподільчому пристрої 11. Далі стабілізована напруга подається до тиристорного комутатора 10, що керує роботою ДПЛАД, та до системи керування 14. Передача енергії приводам жатки збиральної машини здійснюється електричним шляхом, а не механічним, що суттєво знижує втрати потужності у ланках передавання. Система керування 14 реалізує режим вимушених або автоколивань ДПЛАД [3].

Цикл коливального руху ножових смуг складається з часу (t_p), коли ДПЛАД увімкнений і часу (t_o), коли ДПЛАД відключений від джерела живлення з напругою U (рис. 2.2). ДПЛАД у приводі працюють постійно в перехідному режимі [3].

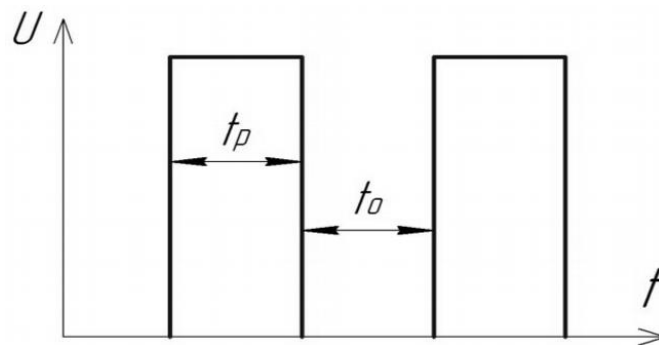


Рис. 2.2. Режим роботи ДПЛАД у приводі [3].

2.5 Математична модель електроприводу двоножового ріжучого апарату в середовищі об'єктно-візуального моделювання Matlab

Математична модель описує роботу ДПЛАД, пружного елемента, рух ножових смуг ріжучого апарату; імпульсне управління роботою ДПЛАД; силу опору трав'яної маси в зазорі між ножовими смугами.

Основне вікно математичної моделі в пакеті Simulink [3] представлено на рис. 2.3. У ньому розташовані блоки, що реалізують систему рівнянь і блокові підсистеми, які розраховують його члени.

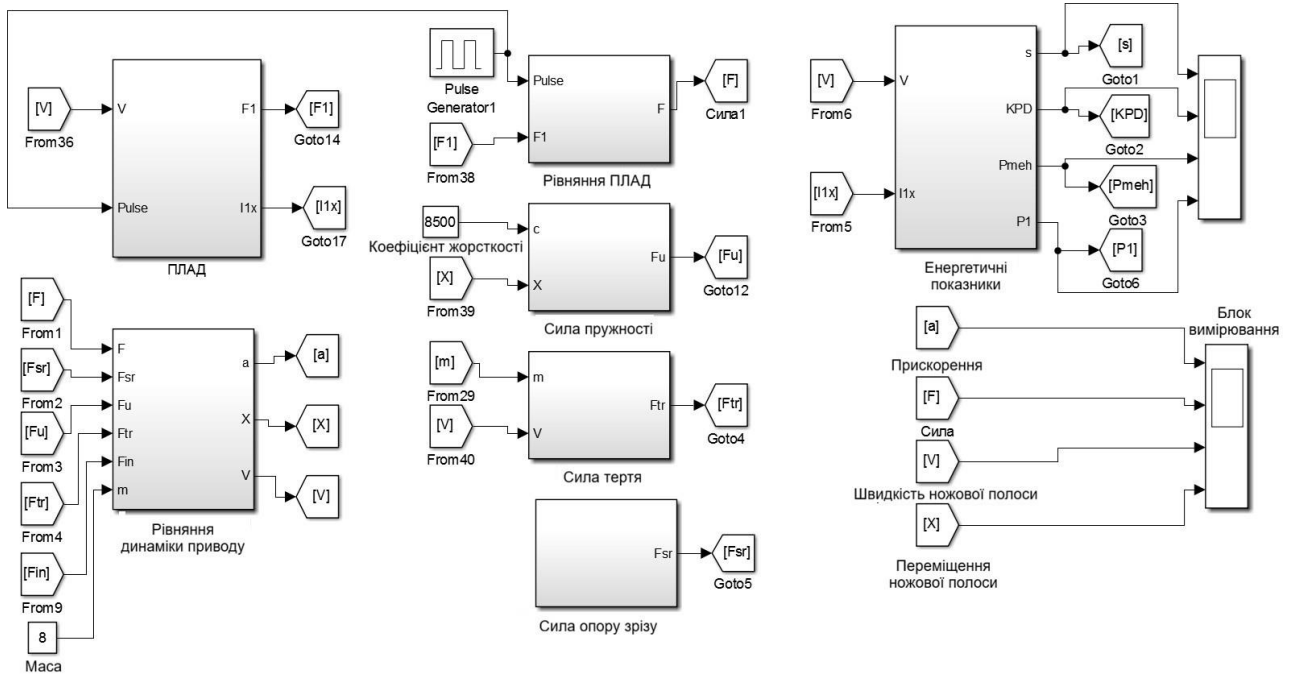


Рис. 2.3. Вікно математичної моделі приводу ДРА жатки в Matlab
 На рисунках 2.4...2.6 наведено деякі вікна підсистем.

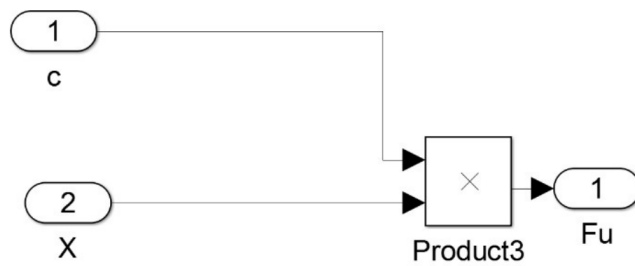


Рис. 2.4. Вікно підсистеми «Сила пружності» в Matlab.

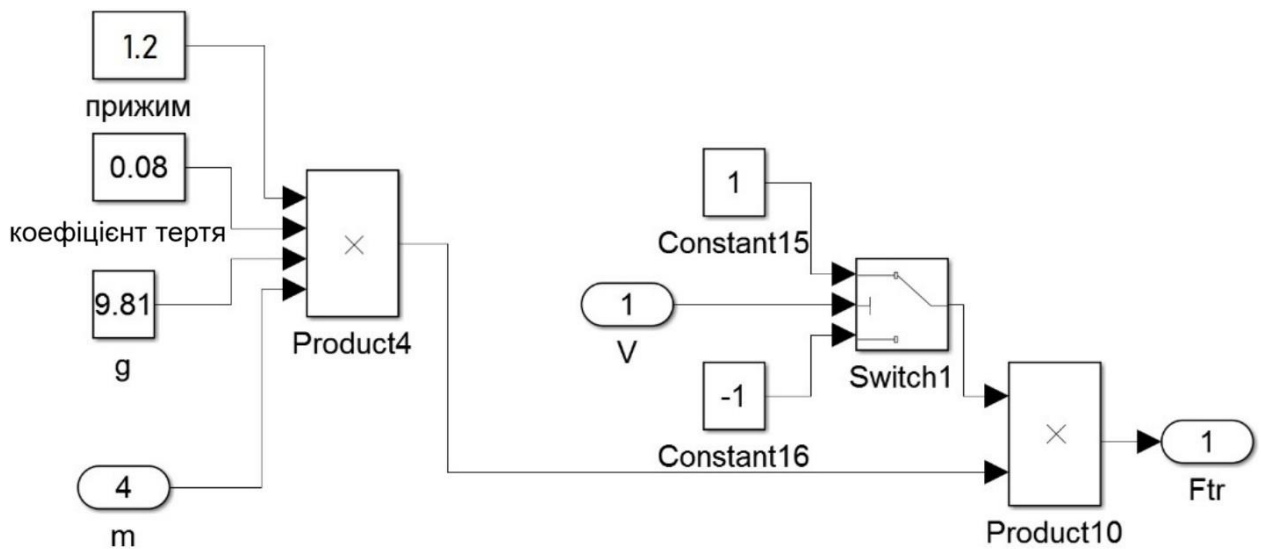


Рис. 2.5. Вікно підсистеми «Сила тертя» в Matlab.

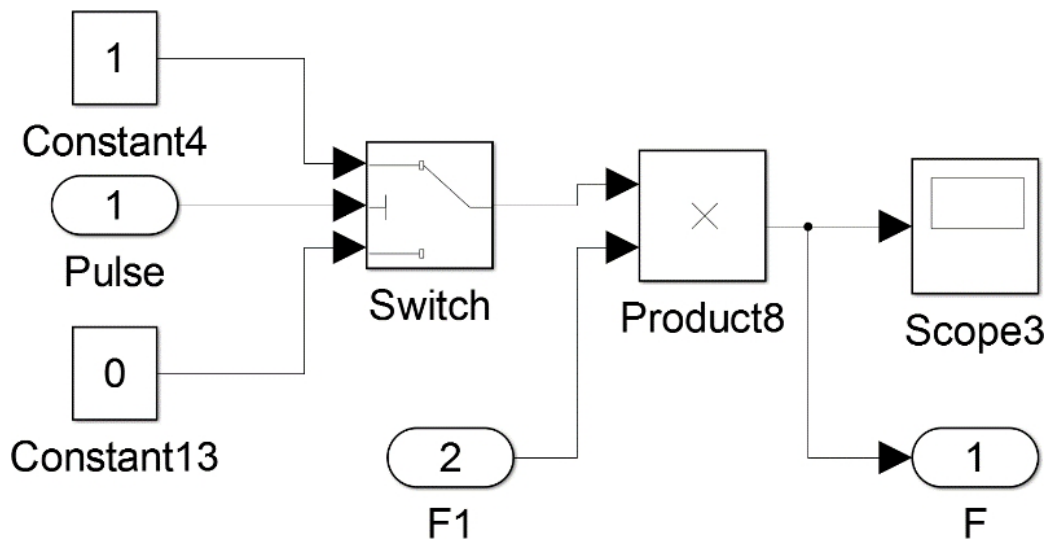


Рис. 2.6. Вікно підсистеми «Управління ПЛАД» в Matlab

На рис. 2.7....2.9 представлені змодельовані тимчасові залежності струмів, що споживаються ДПЛАД, і переміщень вторинних елементів при одинарному і подвійному ходах ножових смуг ДРА в умовах встановлених коливань.

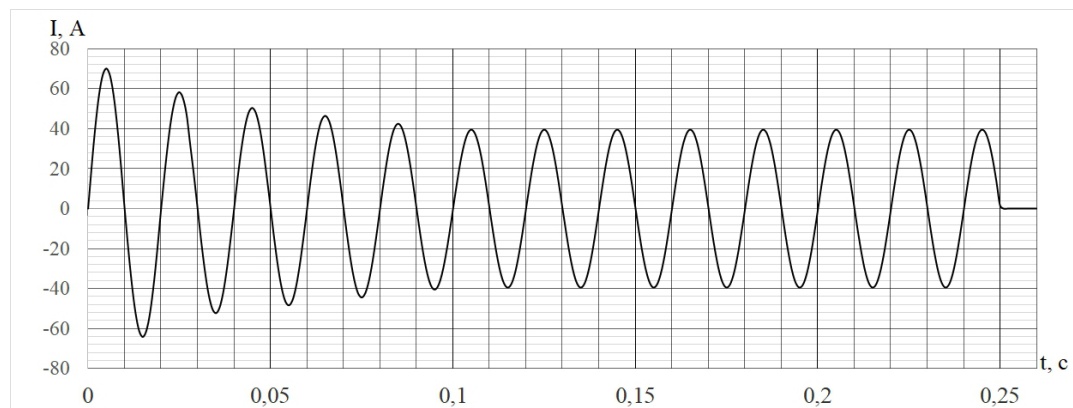


Рис. 2.7. Змодельована тимчасова залежність струму, що споживається індуктором ДПЛАД.

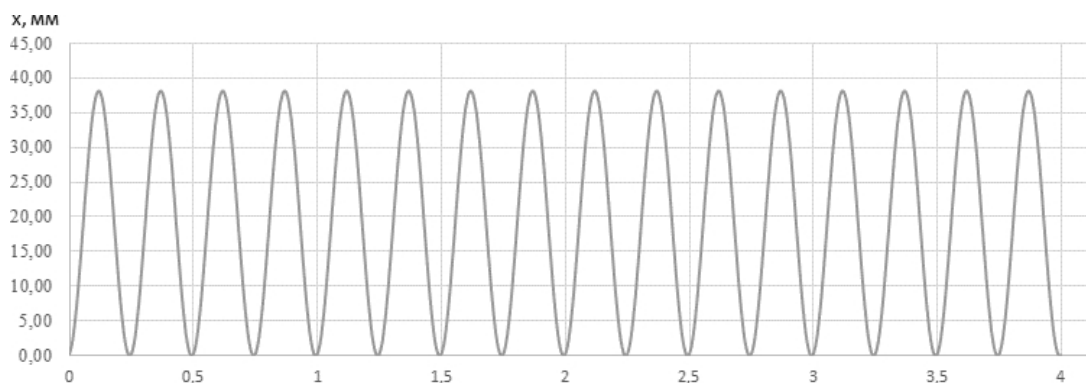


Рис. 2.8. Змодельована часова залежність переміщень вторинних елементів ДПЛАД при одинарному ході ножів ДРА.

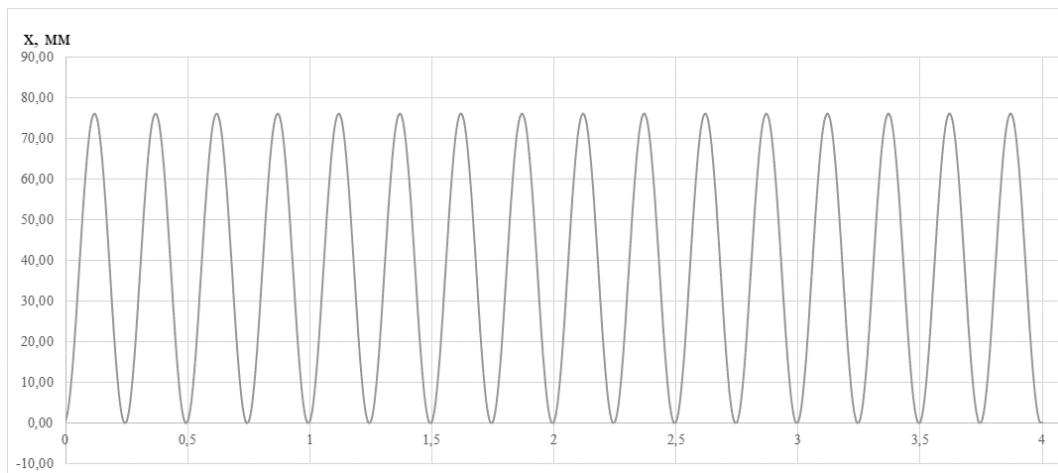


Рис. 2.9. Змодельована часова залежність переміщень вторинних елементів ДПЛАД при подвійних ходах ножів ДРА.

Висновки по розділу

Розроблено математичну модель електроприводу ДРА запропонованої конструкції, яка реалізована в середовищі об'єктно-візуального моделювання Matlab (пакет Simulink). Модель дозволяє досліджувати взаємозв'язки в приводі з урахуванням електромеханічних перехідних процесів ДПЛАД, що працює в імпульсному режимі.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЙНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ДВОНОЖОВОГО РІЗАЛЬНОГО АПАРАТУ ЖАТКИ

3.1. Опис експериментального зразка привода двоножового ріжучого апарата (ДРА) з двостороннім плоским лінійним асинхронним двигуном (ДПЛАД)

В результаті раніше проведених теоретичних досліджень та на основі аналізу технічної та наукової літератури нами створено лабораторні експериментальні зразки привода ДРА з тильним і фронтальним розташуванням ДПЛАД відносно ДРА, зовнішній вигляд яких наведено на рис. 3.1 і 3.2 [1].

На лабораторному експериментальному зразку, наведеному на рис. 3.1, досліджувалася робота ДРА в режимі вимушених коливань [1].

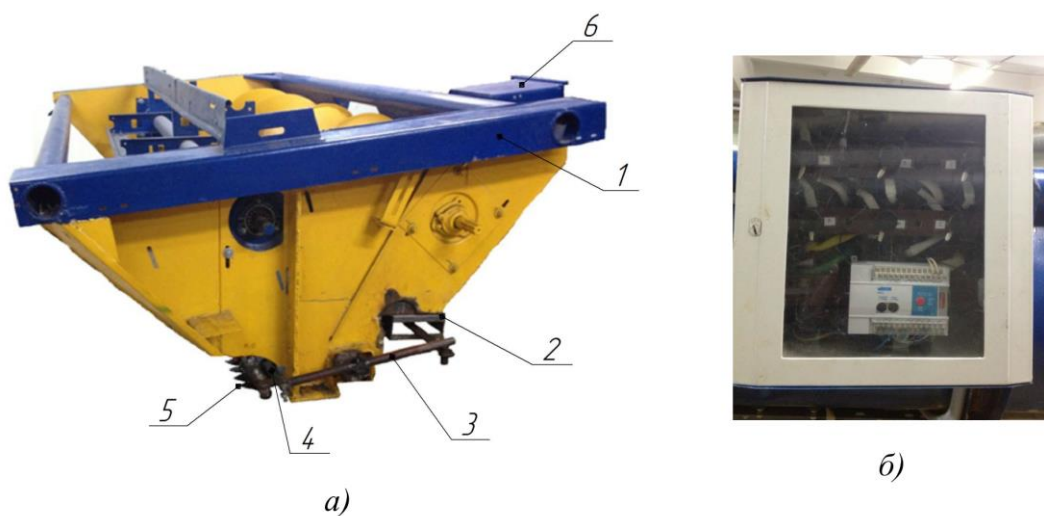


Рис. 3.1. Лабораторний експериментальний зразок електропривода ДРА жатки з тильним розташуванням ДПЛАД: а – конструкція лабораторного зразка; б – блок керування роботою ДПЛАД у приводі; 1 – корпус жатки; 2 – ДПЛАД верхньої ножевої смуги; 3 – важільно-шарнірна система; 4 – пружний накопичувач механічної енергії; 5 – верхня ножева смуга; 6 – система керування роботою ДПЛАД [1].

Експериментальний зразок включає корпус жатки 1, у якому закріплено ДПЛАД 2 верхньої ножової смуги 5, що з'єднані між собою важільно-шарнірною системою 3, пружний елемент 4, блок керування електроприводом 6 та деякі інші конструктивні елементи [1].

Привід нижньої ножової смуги ріжучого апарата повністю ідентичний приводу верхньої смуги [1].

На лабораторному експериментальному зразку, наведеному на рис. 3.2, досліджувалася робота ДРА у режимі автоколивань [1].

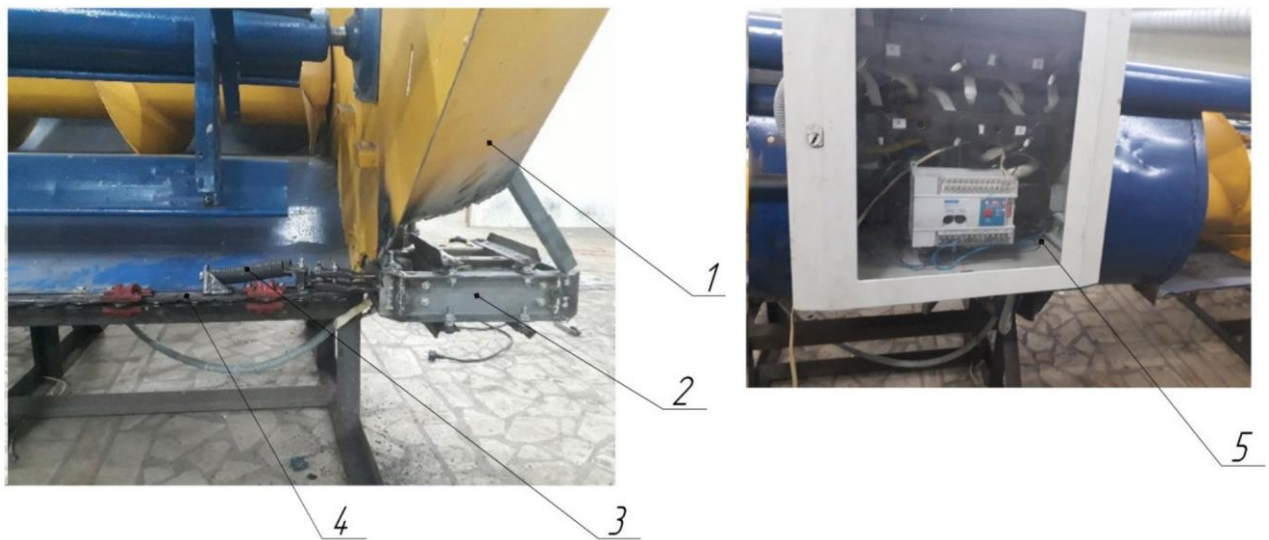


Рис. 3.2. Лабораторний експериментальний зразок електропривода ДРА жатки з фронтальним розташуванням ДПЛАД: 1 – корпус жатки; 2 – ДПЛАД; 3 – пружний накопичувач механічної енергії; 4 – верхня ножова смуга ДРА; 5 – система керування роботою ДПЛАД у приводі ДРА жатки [1].

Для реалізації лінійного асинхронного привода ДРА жатки необхідно було розробити та створити ДПЛАД. Було вирішено використовувати як індуктори ДПЛАД серійно виготовлювані вироби. Як вторинний елемент було прийнято рішення використати алюмінієвий лист товщиною 7 мм, який для підвищення міцності конструкції укріплено металевою сталеву рамкою [1].

На рис. 3.3 подано розроблювану конструкцію ДПЛАД, що застосовується для привода ДРА жатки [1].

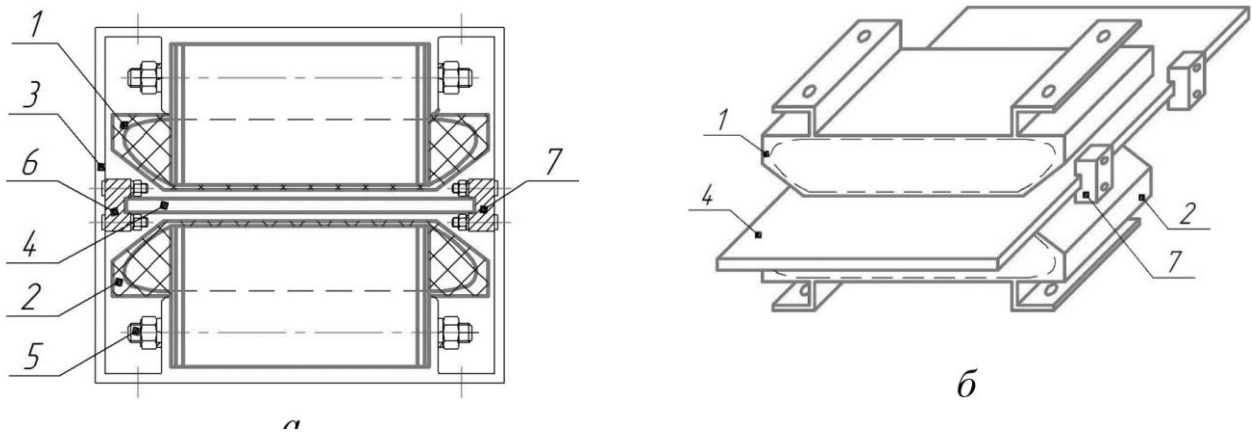


Рис. 3.3. Конструкція розроблюваного ДПЛАД: а – поперечний розріз ДПЛАД; б – розташування елементів ДПЛАД (без корпусної оболонки); 1 – верхній індуктор ДПЛАД; 2 – нижній індуктор ДПЛАД; 3 – корпус ДПЛАД; 4 – вторинний елемент ДПЛАД; 5 – кріпильно-регулювальні болти індукторів; 6, 7 – фторопластові підшипники ковзання [1].

Індуктори ДПЛАД мають такі параметри:

- габаритні розміри індуктора ДПЛАД: довжина×ширина×висота – (230×200× 59) мм;
- полюсне ділення: $\tau = 0,0425$ м;
- кількість полюсів: $2p = 4$;
- кількість зубців: $z = 13$;
- напруга живлення: $U_n = 380$ В, частота мережі: $f = 50$ Гц;
- пускове тягове зусилля: $F_p = 2100$ Н;
- синхронна швидкість: $V_0 = 4,25$ м/с.



Рис. 3.4. Виготовлений ДПЛАД для привода ДРА жатки [1].

Для отримання коливань у приводі ДРА жатки комбайна передбачено імпульсний режим роботи ДПЛАД, за якого до його індукторів за допомогою системи керування періодично підводиться та знімається трифазна напруга живильної мережі [1].

Завдяки імпульсному керуванню, а не використанню способу зустрічного вмикання шляхом чергування фаз, відбувається зменшення пускових струмів ДПЛАД, а отже, і зниження електричних втрат під час комутації фаз [1].

Для створення коливального режиму роботи привода ДРА жатки розроблено системи керування, які дають змогу працювати приводу як у режимі вимушених коливань, так і в режимі автоколивань [1].

Режим вимушених коливань реалізується шляхом періодичної комутації ДПЛАД до джерела змінної напруги [1].

Оснoву схеми керування становить програмований логічний контролер ПЛК63 (рис. 3.5) [1].



Рис. 3.5. Програмований логічний контролер ПЛК63 [1].

Комутація фаз ДПЛАД здійснюється за сигналом від ПЛК63 за допомогою твердотільних реле KIPPRIBOR HT-12044.ZD3 (рис. 3.6), розрахованих на струм 120 А [1].

Для зняття експериментальних залежностей струму індуктора ДПЛД і визначення положення ножової смуги у часі лабораторний експериментальний зразок привода ДРА жатки було оснащено таким вимірювальним обладнанням [1]:

- датчиком лінійного переміщення,
- датчиками струму,
- аналогово-цифровим перетворювачем, з'єднаним із ноутбуком.



Рис. 3.6. Твердотільне реле KIPPRIBOR HT-12044.ZD3.

Сигнали, отримані з датчиків, реєструвалися аналогово-цифровим перетворювачем (АЦП) – багатоканальним осцилографом ACUTE серії DS-1000 (модель DS-1102), який забезпечує можливість подальшої передачі отриманих даних [1].

АЦП дає змогу реєструвати сигнали з датчиків у режимі реального часу на екрані персонального комп'ютера, а також записувати й перетворювати дані для подальшої обробки [1].

Пристрої серії DS-1000 є портативними цифровими запам'ятовуючими осцилографами (ЦЗО або DSO), які підключаються до персонального комп'ютера (ПК) або ноутбука через порт USB 2.0. Для роботи АЦП на ПК необхідно встановити спеціалізоване програмне забезпечення [1].

Для контролю споживаного струму використовувалися датчики струму на основі ефекту Холла фірми Honeywell CSLA1CF (рис. 3.7) [1].

Визначення положення ножової смуги ДРА здійснювалося за допомогою потенціометричного датчика лінійного переміщення фірми «Gefran».

Датчик положення закріплювався безпосередньо в корпусі жатки та механічно з'єднувався з ножовою смугою [1].



Рис. 3.7. Загальний вигляд датчика струму CSLA1CF [1].



Рис. 3.8. Загальний вигляд датчика лінійних переміщень GEFRAN LTS09N09KB5C [1].

3.2. Дослідження роботи електроприводу ДРА на основі ДПЛАД в польових умовах

Для проведення польових випробувань роботи приводу, ДРА з електроприводом на основі ДПЛАД був встановлений на жатку типу ЖВН (рис.3.9).

Далі жатка агрегувалася з шасі на базі самохідної косарки типу КПС. Напруга на ДПЛАД подавалася з блоку управління, який отримував почав живильну напругу від мобільного дизель-генератора. Дизель-генератор і блок управління наведені на рис. 3.11 і 3.112.



Рис. 3.9. Експериментальний зразок ДРА з приводом на основі ДПЛАД



Рис. 3.10. Дизель-генератор і блок управління приводом ДРА



Рис. 3.11. Блок управління приводом ДРА з встановленими всередині АЦП і датчиками струму



Рис. 3.12. Встановлений ДПЛАД з датчиком лінійного переміщення в приводі ДРА

При роботі ПЛАД відбувається перетворення електричної енергії в механічну, при цьому неминуче будуть виникати втрати енергії, які у вигляді

тепла будуть виділятися в навколишнє середовище. Причому чим нижче ККД ПЛАД, тим більшою буде різниця між споживаною і корисною енергією. При цьому ізоляція обмоток є найбільш відповідальною і вразливою частиною ПЛАД з точки зору нагрівання.

При нагріванні ізоляції обмоток її електроізоляційні матеріали починають втрачати свої властивості. Наскільки швидко відбудеться втрата електроізоляційних властивостей, визначає робоча температура ізоляції.

Процес нагрівання досліджують для того, щоб визначити перевищення температури ізоляції обмоток ПЛАД щодо температури охолоджувального середовища при його номінальному навантаженні.

Вимірювання температури ізоляції обмоток ПЛАД в процесі випробування може здійснюватися з використанням наступних методів:

- термоелектричного перетворювача (термопари);
- термометра;
- опору.

Метод термометра - безпосереднє вимірювання температури датчиком температури - термометром.

Метод термоелектричного перетворювача (термопари) - вимірювання температури термопарою. Гарячий спай термопари щільно прикріплюють до об'єкту вимірювання. Холодний спай термопари розміщують у місці, яке не піддається впливу теплових випромінювань і сторонніх повітряних потоків.

Метод опору - вимірювання температури за різницею опору в нагрітому і холодному станах.

Найбільшого поширення з усіх наведених вище методів набув метод опору, оскільки він є найпростішим і при цьому з достатньою точністю визначає середню температуру провідників обмотки.

Зробимо побудову кривих нагрівання і охолодження за методом опору.

Зробимо установку термопар в індуктори ПЛАД, щоб підтвердити достовірність експериментально отриманих даних.

За даними експерименту побудуємо криву нагрівання індукторів ДПЛАД на рис. 3.13.

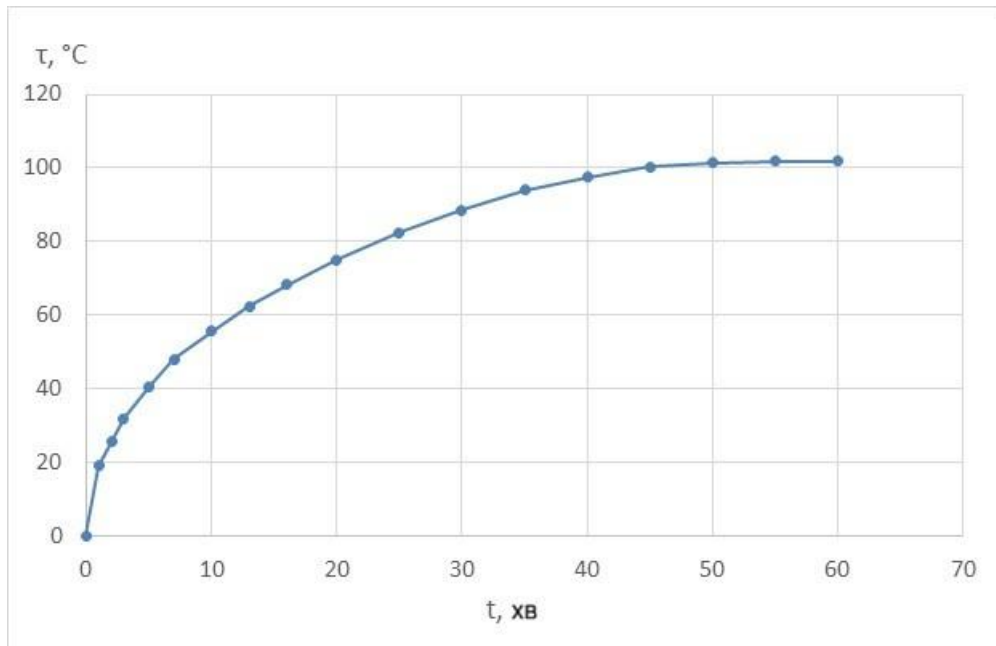


Рис. 3.13. Крива нагріву індукторів ДПЛАД

Результати дослідження процесу охолодження обмоток індукторів ПЛАД представлені на графіку рис. 3.14.

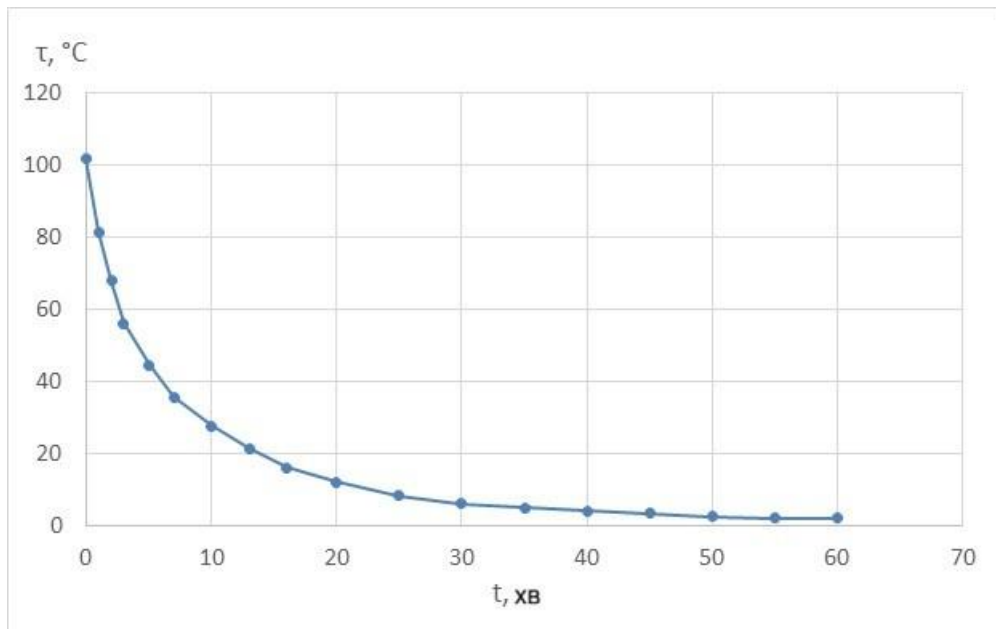


Рис. 3.14. Крива охолодження індукторів ДПЛАД

В ході проведення експериментів виявлено, що температура обмоток індукторів ДПЛАД не піднімалася вище 123,9 °C при температурі

навколишнього середовища 22 °С, що нижче допустимої температури 180 °С для класу ізоляції Н. Дотримання температурного режиму ДПЛАД в процесі роботи підвищує його надійність і термін служби.

3.3 Порівняння результатів теоретичних і експериментальних досліджень

Для порівняння отриманих на експериментальній установці залежностей і теоретичних залежностей, отриманих за допомогою математичного моделювання, поєднаємо їх на одному графіку. На рис. 3.15 наведено залежності струму, що споживається індуктором ДПЛАД, від часу, отримані теоретично та експериментально.

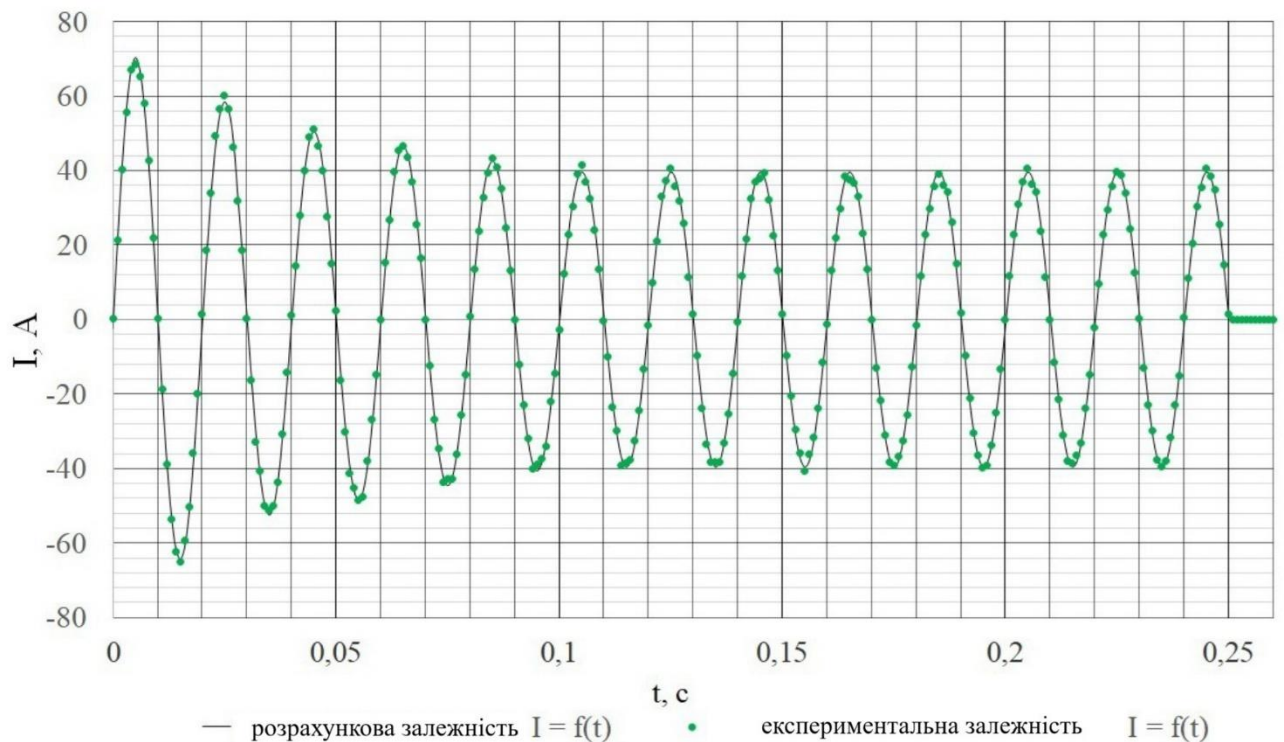


Рис. 3.15. Експериментальна і теоретична часові залежності струму I індуктора ДПЛАД.

Збіг експериментальних часових залежностей амплітуд коливань ножових смуг ріжучого апарату з теоретичною дозволяє зробити висновок про те, що відмінність амплітуди коливань не виходить за межу 9,8 %.

Висновки по розділу

Створено експериментальну установку електроприводу двоножового ріжучого апарату на основі ДПЛАД. Розроблено методику експериментального дослідження приводу ДРА на базі ДПЛАД із застосуванням сучасних програмних і технічних засобів. Проведено вибір контрольно-вимірювальних приладів для виконання вимірювань відповідно до розробленої методики.

Проведено експериментальні дослідження, в результаті яких отримано значення струму, що споживається ДППЛАД, механічний параметр – переміщення ножової смуги ДПЛАД, криві нагрівання та охолодження ДПЛАД.

Встановлено часові залежності фазного струму індуктора ДПЛАД і переміщення ножових смуг, математична обробка результатів експериментів показала, що похибка вимірювань лінійного переміщення ножових смуг не перевищує 9,8 %, струмів, що споживаються ДПЛАД – 8,5 %.

Порівняння теоретичних і експериментальних залежностей показало, що їх максимальна розбіжність не перевищує допустимих величин, що дозволяє вважати зняті експериментальні залежності з достатньою точністю відповідними даним теоретичних досліджень, а розроблену математичну модель адекватно відображає фізичні процеси і використовувати її в практичних розрахунках.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Показано, що застосування конструкцій коливальних приводів ножових смуг жаток, неминуче призводить до ускладнення технологічних машин, зниження їх надійності, технічних і експлуатаційних характеристик. Розроблено конструкцію приводів ріжучих апаратів на базі плоского лінійного асинхронного двигуна зі схемою комутації, що забезпечує роботу двоножового ріжучого апарату як з одинарними, так і подвійними ходами ножів.

На основі розробленої математичної моделі електроприводу двоножового ріжучого апарату жатки обрано параметри, за яких будуть досягатися раціональні енергетичні та технологічні показники роботи. Доведено збільшення швидкості руху ножових смуг в 1,4 рази, що дозволяє збільшити продуктивність жатки. Досліджено залежність швидкості руху ножової смуги від її переміщення. Визначено оптимальні амплітуди коливань ножових смуг 38,1 для одинарного ходу ножової смуги і 76,2 мм для подвійного ходу ножової смуги за критерієм максимуму швидкості руху ножових смуг.

Запроектовані та розроблені дослідні зразки коливального лінійного асинхронного електроприводу двоножового ріжучого апарату жатки на базі плоского лінійного асинхронного двигуна з можливістю регулювання параметрів, що працюють у режимі вимушених коливань і автоколивань. На їх базі проведено великий обсяг досліджень моделей коливального лінійного асинхронного електроприводу. Математична обробка результатів експериментів показала, що похибка вимірювання положення ножових смуг не перевищує 9,8 %, а вимірювання струму, що споживається лінійний асинхронний двигун – 8,5 %, що дозволяє вважати зняті експериментальні залежності з достатньою точністю відповідними даним теоретичних досліджень, а розроблену математичну модель адекватно відображає фізичні процеси і використовувати її в практичних розрахунках.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Міненко С.В., Морозов О.В. Опис експериментального зразка привода двоножового ріжучого апарата з двостороннім плоским лінійним асинхронним двигуном. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції "Сучасні проблеми землеробської механіки" (17–19 жовтня 2025 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. С. 324-328.
2. Міненко С., Морозов О. Компонування жатки з лінійним електроприводом за місцем розташування двостороннього плоского лінійного асинхронного двигуна. Сучасні технології та технічний сервіс: виклики і можливості: збірник матеріалів I Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Кам'янець-Подільський, 16 жовтня 2025 року). Кам'янець-Подільський: Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», 2025. С. 106-110.
3. Морозов О.В. Кінематична схема лінійного електропривода двоножового ріжучого апарата. Наукові читання – 2025: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками I-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 23 квітня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. Том 2. С. 74-75.
4. Грубань В. А. Ріжучі апарати жаток зернозбиральних комбайнів та шляхи їх удосконалення. Вісник аграрної науки. 2019. № 6. С. 45–51.
5. Кравчук В. І., Грубань В. А. Сільськогосподарські машини. Збиральні машини : підручник. Київ : Аграрна освіта, 2018. 512 с.
6. Морозов О. В., Міненко С. В. Аналіз конструкцій приводів ножових апаратів зернозбиральних жаток. Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. 2023. № 1. С. 112–118.

7. Міненко С. В., Морозов О. В. Експериментального зразка привода двоножового ріжучого апарата з двостороннім плоским лінійним асинхронним двигуном. Збірник тез доповідей XXVI Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (17–19 жовтня 2025 року). МОН України, Національний університет біоресурсів і природокористування України. С. 324–328.
8. Бабич М. І. Теорія та розрахунок сільськогосподарських машин. Львів : Світ, 2017. 436 с.
9. ДСТУ ISO 4254-1:2019. Сільськогосподарські машини. Вимоги безпеки. Загальні вимоги. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 98 с.
10. Boldea I., Nasar S. A. Linear Electric Actuators and Generators. Cambridge : Cambridge University Press, 1997. 540 p.
11. Srivastava A. K., Goering C. E., Rohrbach R. P. Engineering Principles of Agricultural Machines. 2nd ed. St. Joseph : ASABE, 2006. 601 p.
12. Hunt D. R. Farm Power and Machinery Management. 10th ed. Ames : Iowa State Press, 2008. 384 p.
13. Ebrahimi R., Mohtasebi S. S., Rafiee S. Vibration analysis of cutting platform in combine harvester headers. Measurement. 2013. Vol. 46. P. 3959–3968.
14. Yuan L., Zhang Q., Li Y. Design and experimental study of a double-knife cutting system for combine headers. Agriculture. 2023. Vol. 13(4). P. 1–14.
15. Jiao Z., Sun H., Wang Y. Design and analysis of linear oscillating electromagnetic actuators. Applied Sciences. 2019. Vol. 9(11). P. 1–18.
16. Schumacher Group. Knife drive systems for combine harvesters. Technical brochure. Eichelhardt, Germany, 2021. 36 p.
17. Claas Group. Cutterbars and header systems for combine harvesters. Product documentation. Harsewinkel, 2022. 52 p.
18. US Patent US20150163994A1. Cutter assembly for agricultural harvester header. United States Patent Office, 2015.

19. Pérez Rodríguez C. Caracterización de un motor lineal de inducción. Trabajo Fin de Máster. Universidad Politécnica de Madrid, 2011. 94 p.
20. García A., López J. Maquinaria agrícola de recolección de cereales. Madrid : Mundi-Prensa, 2016. 420 p.
21. Interempresas. Plataformas y barras de corte para cosechadoras modernas. Revista Interempresas Agrícola. 2019. № 12. P. 28–35.
22. LinMot. Motores lineales industriales: principios y aplicaciones. Manual técnico. Spreitenbach, 2020. 48 p.
23. Martínez L., Sánchez R. Sistemas electromecánicos aplicados a maquinaria agrícola. Valencia : Editorial UPV, 2018. 286 p.