

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

Факультет інженерії та енергетики
Кафедра електрифікації, автоматизації
виробництва та інженерної екології
Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Сібірук Віталій Анатолійович

УДК 620.93

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**Підвищення ефективності застосування технологічних машин з зворотно-
поступальним рухом робочого органу шляхом застосування лінійного
електроприводу**

141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”
(шифр і назва спеціальності)

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

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи
Палійчук В.К.
к.т.н., доцент

Житомир – 2021

АНОТАЦІЯ

Сібірук Віталій Анатолійович. Підвищення ефективності застосування технологічних машин з зворотно-поступальним рухом робочого органу шляхом застосування лінійного електроприводу. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”. – Поліський національний університет, Житомир, 2021.

В магістерській роботі виявлено основні переваги лінійного електроприводу на базі лінійного асинхронного двигуна. Визначено коефіцієнт придатності $(K_{cz})_T$ електроприводів для використання в сільському господарстві для отримання зворотно-поступального руху, який дорівнює: для лінійного електроприводу з різночастотним живленням обмоток $(K_{cz})_m=4\%$, для лінійного електроприводу зі зворотною пружиною $(K_{cz})_m=46\%$, для лінійного асинхронного двигуна із різночастотним живленням $(K_{cz})_m=50\%$. Встановлено, що найбільш ефективним для приводу зворотно-поступального руху с/г машин є лінійний електропривод на основі лінійного асинхронного двигуна. Найбільший вплив на амплітуду і частоту зворотно-поступального руху робочого органу с/г машин має величина різниці частот напруги живлення. При $f_2=45$ Гц $A=0,06$ м, $\nu=5$ Гц, а при $f_2=35$ Гц, $A=0,02$ м, $\nu=15$ Гц (для лінійного асинхронного двигуна потужність 3,0 кВт).

Розроблено конструкції вібропневмосепаратора на базі лінійного асинхронного двигуна з різночастотним живленням обмоток та поворотною пружиною. Запропоновані конструкції дозволяють повністю реалізувати функції кривошипно-шатунного механізму, як перетворювача руху та виключити його з кінематичної схеми, завдяки чому відбувається спрощення технічної реалізації приводів с/г машин.

Ключові слова: лінійний асинхронний двигун, привід, зворотно-поступальний рух, сільськогосподарська машина

ANNOTATION

Sibiruk Vitaliy Anatoliyovych. Improving the efficiency of technological machines with reciprocating motion of the working body by using a linear electric drive. – *Qualification work on the rights of the manuscript.*

Qualification work for a master's degree in the specialty 141 "Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics". - Polissya National University, Zhytomyr, 2021.

The master's thesis reveals the main advantages of a linear electric drive based on a linear induction motor. The coefficient of suitability (K_{sg}) of electric drives for use in agriculture to obtain reciprocating motion, which is equal to: for linear electric drive with different frequency supply of windings $(K_{cz})_m = 4\%$, for linear electric drive with return spring $(K_{cz})_m = 46\%$, for a linear asynchronous motor with different frequency power supply $(K_{cz})_m = 50\%$. It is established that the most effective for the drive of reciprocating movement of agricultural machines is a linear electric drive based on a linear asynchronous motor. The greatest influence on the amplitude and frequency of reciprocating motion of the working body of agricultural machinery has the value of the difference in frequency of the supply voltage. At $f_2 = 45$ Hz $A = 0.06$ m, $v = 5$ Hz, and at $f_2 = 35$ Hz, $A = 0.02$ m, $v = 15$ Hz (for linear asynchronous motor power 3.0 kW).

The designs of the vibro-pneumatic separator on the basis of the linear asynchronous motor with different-frequency supply of windings and a return spring are developed. The proposed designs allow to fully implement the functions of the crank mechanism as a motion converter and exclude it from the kinematic scheme, thereby simplifying the technical implementation of the drives of agricultural machinery.

Keywords: linear asynchronous motor, drive, reciprocating motion, agricultural machine

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ТЕНДЕНЦІЯ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ЗВОРОТНО-ПОСТУПАЛЬНОГО РУХУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....	9
РОЗДІЛ 2. ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИВОДУ С/Г МАШИН ЗВОРОТНО-ПОСТУПАЛЬНОГО РУХУ НА ОСНОВІ ЛАД.....	20
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЙ С/Г МАШИНИ ЗВОРОТНО-ПОСТУПАЛЬНОГО РУХУ З ЛАД.....	26
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	33
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	34

ВСТУП

Актуальність теми. Розвиток сільського господарства та задоволення потреб населення країни у сільськогосподарській продукції можливі за рахунок комплексної механізації сільськогосподарського виробництва, що забезпечується постійним удосконаленням технологічних процесів, створенням принципово нових машин та обладнання та модернізацією існуючого. Розробка нових електроприводів для сільського господарства залишається важливим та актуальним завданням.

Від технічної оснащеності та ефективності застосовуваних технологічних машин безпосередньо залежать собівартість, якість та кількість сільськогосподарської продукції. Робочі органи технологічних машин здійснюють різні за характером руху – поступальні, обертальні, зворотно-поступальні, коливальні.

Найбільш поширеним приводом інструменту, що здійснює коливальний рух, є електропривод обертального або поступального руху, що використовує для отримання поворотно-поступального руху різного роду механічні перетворювачі або редуктори. Головним недоліком застосовуваних у сільськогосподарському виробництві машин є знижені техніко-економічні показники, пов'язані з необхідністю застосування перетворювачів обертального руху валу приводного електродвигуна в коливальний рух робочого органу машини (клинопасова передача, ексцентрикний коливач), що значно збільшує масу та габарити. Велика металомісткість, втрати енергії, складність регулювання та інтеграції з робочим інструментом змушує шукати шляхи отримання зворотно-поступального руху без механічних редукторів.

Удосконалення конструкцій с/г машин за рахунок суміщення робочого органу та електродвигуна, що має високі техніко-економічні показники, має актуальне значення. Поєднання робочого органу с/г машин та ротора електродвигуна дозволяє зменшити масу та розміри машин, виключити з

електроприводу перетворювач руху у вигляді редуктора або іншого передавального механізму, покращити умови тепловіддачі, охолодження та вентиляції [1].

Вібраційну техніку широко застосовують у багатьох технологічних процесах, оскільки це дозволяє підвищити техніко-економічні показники машин; покращити якість багатьох технологічних процесів, технологічні та експлуатаційні параметри машин; механізувати нові технологічні процеси; видозмінити конструкції машин, зменшити їх вагу, підвищити надійність та довговічність.

Вібраційні технології характеризуються зниженими енерговитратами порівняно з традиційними та знаходять успішне застосування у різних сферах с/г виробництва. Різноманітність технологічних процесів та об'єктів впливу зумовлює використання різних типів віброзбудників робочих органів, кожен з яких має відмінні риси [2].

Проте АПК із запровадження новітньої, зокрема вібраційної, техніки відстає від багатьох галузей промисловості та будівництва, хоча найбільше потребує інтенсифікації технологічних процесів.

Дослідження у системі АПК показують, що з підвищенням якості виконання технологічних процесів із застосуванням вібромашин потрібно регулювати як частоту, а й амплітуду коливань робочих органів вібромашин [3].

Нині в сільському господарстві та інших галузях промисловості модернізації вимагає технічно і морально застарілий електропривод с/г машин, у складі якого входять механічні передачі, перетворювачі виду руху. Тому основні технічні рішення мають бути спрямовані на спрощення кінематичних схем приводу шляхом зменшення кількості передавальних ланок.

Таким чином, спрощення кінематичних схем електроприводів зворотно-поступального руху є актуальним завданням.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності застосування технологічних машин зі зворотно-поступальним рухом робочого органу шляхом застосування лінійного електроприводу при різночастотному живленні, удосконалення конструкцій сільськогосподарських машин за рахунок розробки лінійного електроприводу, що вбудовується, на основі лінійного асинхронного двигуна.

Завдання дослідження:

1. Обґрунтування доцільності застосування лінійного електроприводу робочих органів с/г машин зі зворотно-поступальним рухом.

2. Проведення комплексних досліджень режимів роботи лінійного асинхронного двигуна та визначення впливу різних факторів на амплітуду та частоту зворотно-поступального руху робочих органів с/г машин з лінійним електроприводом.

3. Розробка конструкцій с/г машин з лінійним електроприводом зворотно-поступального руху робочих органів на основі лінійного асинхронного двигуна.

5. Проведення експериментальних досліджень для перевірки адекватності результатів

Об'єкт дослідження: с/г машини зі зворотно-поступальним рухом робочих органів та лінійним електроприводом.

Предмет дослідження: закономірності та взаємозв'язок характеру зворотно-поступального переміщення робочих органів с/г машин з режимами роботи лінійних асинхронних двигунів (ЛАД) при різночастотному живленні.

Методи дослідження. У роботі був використаний ряд конкретних методів: класифікації, статистичного спостереження, порівняльного і факторного аналізу та ін. Для оцінки впливу різних факторів на електромеханічні характеристики лінійного електроприводу використовувалися методи математичного планування експерименту. Перевірка адекватності отриманих теоретичних результатів здійснювалася експериментальними методами із застосуванням сучасних засобів вимірювальної техніки. В

експериментальних дослідженнях використовувалися сучасні засоби вимірювальної техніки.

Перелік публікацій за темою роботи:

2. Палійчук В.К., Кравчук О.М., Шадура В.П., Косоголов І.Б., **Сібірук В.А.** Вивчення електромагнітних процесів приводу с/г машин зворотно-поступального руху на основі лінійного асинхронного двигуна. Збірник тез *VI-ї* всеукраїнської науково-практичної конференції «*Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь*» 30-31 квітня 2020 року. Житомир : ЖАТК. С. 208-210.

2. Палійчук В.К., Кравчук О.М., Шадура В.П., Косоголов І.Б., **Сібірук В.А.** Тенденція розвитку електроприводів зворотно-поступального руху сільськогосподарського призначення. Збірник тез *VII-ї* всеукраїнської науково-практичної конференції «*Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь*» 31 березня 2021 року. Житомир : ЖАТК. С. 183-184.

3. Палійчук В.К., Кравчук О.М., Шадура В.П., Косоголов І.Б., **Сібірук В.А.** Особливості вибору трифазного генератора для енергетичної установки при використанні відновлюваних джерел енергії малих річок. IV Всеукраїнська науково-практична інтернет конференція «Сучасні технології в енергетиці, електромеханіці, системах управління та машинобудуванні» (м. Бахмут, 25-26 листопада 2021 р.), Бахмут : ННПП «УПА». С. 53-54

Практичне значення одержаних результатів. Розроблені технічні рішення щодо об'єднання електродвигуна та с/г машини можуть бути використані при розробці різних с/г машин зі зворотно-поступальним рухом робочих органів.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 14 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 35 сторінок комп'ютерного тексту, містить 2 таблиці і 17 рисунків.

РОЗДІЛ 1

ТЕНДЕНЦІЯ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ЗВОРОТНО-ПОСТУПАЛЬНОГО РУХУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Сільськогосподарські машини належать до технологічного обладнання. Кожна їх виконує одну або кілька операцій, при яких відбувається якісна зміна оброблюваного матеріалу, його розмірів, стану, форми, фізичних і біологічних властивостей.

На відміну від промисловості у сільському господарстві машини вступають у безпосередню взаємодію із живою природою. Тому при створенні нових машин або виборі їх із зразків, що випускаються промисловістю, враховують технологічні властивості та агробіологічні особливості оброблюваних рослин, ґрунтово-кліматичні умови та терміни роботи. Для успішного застосування машин важливо так, щоб рослини були пристосовані для машинної технології їх обробітку.

Сільськогосподарські машини бувають мобільні, стаціонарні та пересувні. Мобільні це польові машини, робочий процес яких протікає під час їх руху. Вони обробляють матеріал, розосереджений по полю. Стаціонарні машини, що встановлюються на точках, пунктах переробки врожаю або підготовки насіння, обробляють матеріал, що доставляється транспортними засобами. Пересувні машини забезпечені колісним ходом. Їх перевозять з однієї позиції на іншу для обробки матеріалу, що знаходиться там.

Сучасне сільськогосподарське виробництво характеризується високим рівнем електрифікації сільськогосподарських машин та обладнання. Електропривод є енергосиловою основою сучасного виробництва, споживаючи при цьому близько 60% електроенергії, що виробляється [4]. Сільське господарство є третім за величиною споживачем електричної енергії [5]. Основу електроприводу сільськогосподарських машин, згідно [6-11], складають

трифазні та однофазні асинхронні електродвигуни змінного струму Потужність застосовуваних електродвигунів перебуває у широкому діапазоні від 0,8 до 160 кВт, при цьому 70..90% від загальної кількості перебувають у діапазоні потужності від 10 до 13 кВт [12,13].

Робочі органи технологічних машин здійснюють різні за характером руху (поступальний, обертальний, зворотно-поступальний, коливальний). У рослинництві та процесах виробництва та переробки продуктів переважає зворотно-поступальний і коливальний рух [4, 5].

Найбільш поширений пристрій для створення коливального руху технологічного обладнання – відцентрові віброзбудники, що конструктивно поділяються на дебалансні і планетарні [6].

Для узгодження обертального руху валу електродвигуна зі зворотно-поступальним рухом робочого органу застосовуються механічні перетворювачі виду руху: кривошипно-шатунний, кулісний, кулачковий та різні їх варіації та поєднання. Кожен такий механічний перетворювач має десятки поверхонь, що труться. Через їх знос, а часом і пошкодження деталей і вузлів редукторного приводу, виникають простої технологічного устаткування [7].

Часто для отримання низьких швидкостей або перетворення одного виду руху на інший використовуються редуктори, ланцюгові, ремінні, черв'якові передачі, ексцентрики, які збільшують габарити, масу, вартість електрообладнання, а також знижують їхню експлуатаційну надійність і підвищують витрати на експлуатацію. Як зазначено у роботах проф. Свічника Д.В., маса редуктора складає до 80% всієї маси виконавчого механізму. Крім того, редуктор вносить люфти, змінює пружний характер спряження, момент інерції та інші параметри [8].

В даний час у сільському господарстві в основному для отримання зворотно-поступального руху робочих органів використовуються асинхронні двигуни із перетворювачами руху. Недоліками такого приводу є збільшені масо-габаритних показників приводу, а також складність у зміні та регулюванні

параметрів зворотно-поступального руху робочих органів (амплітуди та частоти) через жорсткий кінематичний зв'язок приводу.

В сільському господарстві використовуються різні машини, у яких для отримання необхідних рухів робочих органів використовуються перетворювачі руху. Такі конструкції мають великі габарити та масу. Крім цього, втрати енергії в редукторах становлять близько 30% потужності електроприводу.

Спрощення кінематичних схем приводів с/г машин, зниження масогабаритних показників є актуальним завданням, яке може бути вирішено застосуванням у приводах сільськогосподарських машин із зворотно-поступальним рухом робочих органів ЛАД. Метою створення конструкцій сільськогосподарських машин із ЛАД є спрощення кінематичних схем приводу.

ЛАД може бути отриманий із звичайного циліндричного асинхронного двигуна (АД) із замкнутим магнітопроводом, виконавши наступні перетворення:

- видалити (або відключити) частину обмотки статора, обмеживши розподіл струму;
- прибрати ділянку магнітопроводу статора, що не містить обмотки зі струмом;
- розгорнути ротор і статор у смугу, отримавши при цьому вторинний елемент кінцевої довжини.

Перші спроби об'єднання двигуна з виконавчим механізмом відносяться до початку ХХ ст., коли був створений магнітофугальний молоток, бойок якого здійснював зворотно - поступальний рух під дією рухомого магнітного поля. Подальший розвиток безредукторної системи приводу знайшли в роботах інж. Фрідкіна П.А.

Вирішення проблеми усунення проміжних перетворювачів швидкості та виду руху можливе застосуванням у приводі лінійних електричних машин. Застосуванням у приводі технологічних машин лінійних електричних двигунів займалися відомі вчені, серед яких необхідно відзначити Вольдека А.І.,

Винокурова В.А., Веселовського О.М., Сарапулова Ф.М., Свечарника Д.В., Соколова М.М., Петленко Б.І., Луковнікова В.І., Ямамура С, Тійсмуса Х.А., Фрідкіна П.А., Мамедова Ф.А., Аіпова Р.С., Насара С. А., Болдеа І., Лейтвейт Е.Р., Епіфанова А.П. та інших.

У [9 - 14] запропоновано було використовувати ЛАД у приводі машин із зворотно-поступальним рухом робочих органів. На рис. 1.2. наведено структурну схему такого приводу. Для перетворення поступального руху трифазного ЛАД у зворотно-поступальний рух вторинного елемента обмотка трифазного ЛАД підключена до мережі живлення через систему імпульсного управління (СІУ) двигуном, а до вторинного елемента ЛАД, приєднана пружина, закріплена на нерухомій опорі. При подачі живлення на обмотку трифазного ЛАД він переміщує вторинний елемент, розтягуючи закріплену до корпусу пружину. При досягненні вторинним елементом заданого СІУ положення, сигналу датчика положення СІУ комутатор (К) відключає обмотку трифазного ЛАД від мережі. За рахунок запасеної пружиною потенційної енергії при переміщенні вторинний елемент повертається в початкове положення, при цьому з датчика СІУ надходить сигнал включення живлення на обмотку трифазного ЛАД. Далі цей цикл роботи повторюється. Таким чином, СІУ дає можливість змінювати амплітуду та частоту зворотно-поступального руху сільськогосподарських машин за рахунок налаштування моменту включення та відключення трифазного ЛАД, а отже отримувати значення частоти та амплітуди зворотно-поступального руху, за яких досягається найбільш сприятливі результати обробки сільськогосподарської продукції.

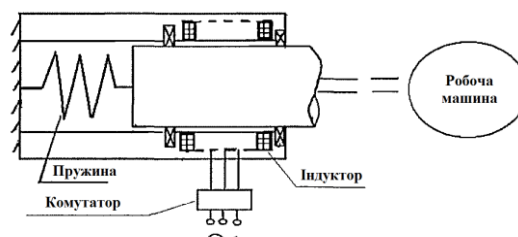


Рис. 1.1. Структурна схема електроприводу на базі ЛАД зі зворотною пружиною

Наявність у кінематичній схемі приводу пружини дозволяє зменшити електроенергію, що споживається з мережі, за рахунок повернення корпусу в початкове положення під дією потенційної енергії пружини.

Слід зазначити недоліки даної конструкції:

1. Підвищене споживання установкою електричної енергії з допомогою комутації ЛАД. За частих комутаціях споживання електричної енергії збільшується на 25%.

2. Непрямий спосіб регулювання амплітуди та частоти зворотно-поступального руху робочих органів сільськогосподарських машин, що досягається за рахунок налаштування моменту включення та відключення ЛАД, що вимагає проміжку часу, під час якого технологічне обладнання простоює, знижуються показники продуктивності, а отже і собівартість продукції.

3. Частота зворотно-поступального руху ЛАД із пружиною змінюється при зміні навантаження, яке у сільськогосподарських машинах практично завжди є змінним.

4. Використання пружини з ЛАД можливе за умови досягнення їхнього резонансу.

5. Знижені економічні показники ЛАД із пружиною зумовлені, невисокою продуктивністю сільськогосподарських машин із названим типом приводу.

Останнім часом з'явилися електроприводи, що використовують різночастотне живлення фаз електродвигуна. Використання мехатронних технологій при створенні ВіЕМС з рекуперацією електричної енергії може суттєво покращити енергетичні показники, покращити керованість машиною з урахуванням характеру її роботи у процесі експлуатації.

В роботі [5] було запропоновано використовувати двигун коливального руху для приводу сільськогосподарських машин. Такий рух досягалося шляхом живлення статорних обмоток асинхронного двигуна циліндричної конструкції струмами різних частот. При цьому одна обмотка підключена безпосередньо до мережі, а дві інші, послідовно з'єднані, підключені до джерела з регульованою

частотою. Поле в повітряному зазорі змінюється від кругового до пульсуючого зі зміною чергування числа фаз, що призводить до створення моменту, що періодично змінюється на валу двигуна [13].

Якісно інші можливості обмеженого об'єднання машини-двигуна та машини-знаряддя без застосування механічних передач у сільськогосподарських машинах зворотно-поступального руху з'являються при використанні електроприводу спеціальної конструкції, заснованого на застосуванні ЛАД із перетворювачем частоти [4, 5, 6]. Це особливі двигуни унікальної конструкції, так як є частиною відповідного устаткування. Тому двигуни із розімкнутою конструкцією магнітопроводу випускаються дрібними серіями.

ЛАД знаходять досить широке застосування за кордоном у різних галузях техніки для отримання зворотно-поступального руху, прикладом може служити використання ЛАД як тягові двигуни пасажирського транспорту і т.д.

Умови роботи сільськогосподарських машин відрізняється широким варіюванням властивостей оброблюваних ними матеріалів. Вони постійно піддаються впливу природно-кліматичних факторів. Це висуває низку вимог до машин.

Для машин кожної групи розроблено агротехнічні вимоги до якості виконуваних ними робіт. З аналізу [1-11] можна зробити висновок, що сільськогосподарські машини зворотно-поступального руху в основному характеризуються невеликою амплітудою (0,05-0,1 м), низькою частотою (2-5 Гц) та високою масою рухомої частини (100кг) .

Як приклад установок зворотно-поступального руху розглянемо установку для очистки і сортування насіння (вібросепаратор). Очищення та сортування насіння в псевдозрідженому шарі – один з найбільш ефективних способів підвищення їх якості. Реалізується він у вібропневмосепараторах (ВПС) (рис. 1.2). ВПС з трапецієподібною формою деки, що використовуються для остаточного очищення насіння з метою підвищення їх біологічної цінності

виділення домішок з основного матеріалу, що важко відокремили, отримали широке розповсюдження.

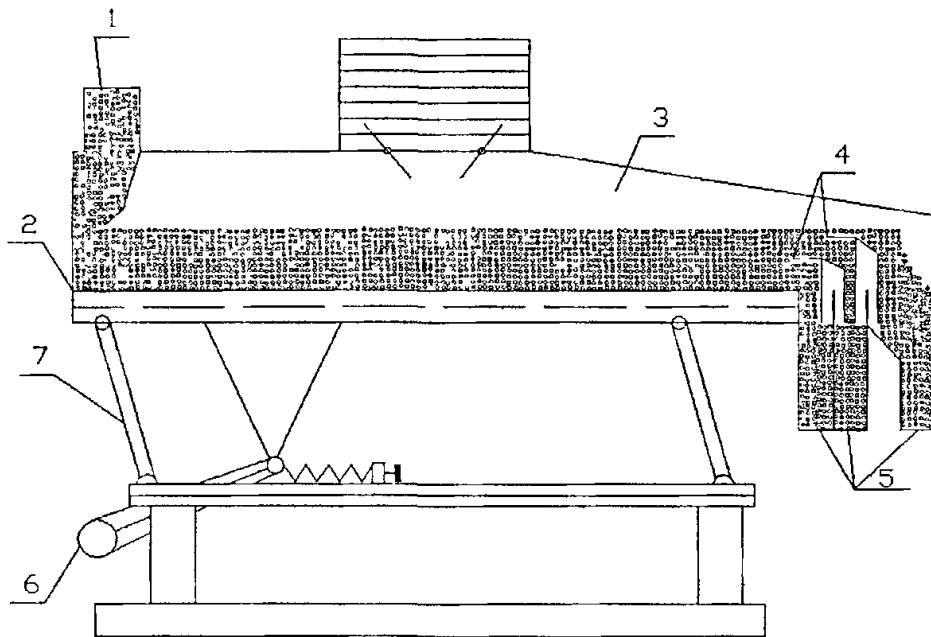


Рис. 1.2. Вібропневмосепаратор 1 – приймальний бункер; 2 – дека; 3 – вакуумна камера; 4 – ділянка псевдозрідженого шару; 5 – приймачі фракцій насіння; 6 – вібропривід; 7 – хитаючі опори; 8 – корпус.

ВВС включає корпус, в якому розташовані: приймальний бункер, вакуумна камера, ділянка псевдозрідженого шару, приймачі фракцій насіння, прямоточна дека, до якої жорстко закріплені хитаючі опори.

Вібропривод розташований під декою. Електродвигун – асинхронний двигун обертання через ремінну передачу з'єднаний з механізмом перетворення обертального руху на зворотно-поступальний, з'єднаний з корпусом за допомогою тяги, жорстко пов'язаної з корпусом.

Аналіз літературних джерел [1-10] дозволяє провести порівняння конструктивних особливостей та енергетичних показників асинхронного трифазного двигуна з редуктором (АТДР), асинхронного трифазного двигуна без редуктора (АТД) та асинхронного трифазного двигуна без редуктора з перетворювачем частоти (АТД ПЧ). Наведемо такі види їх двійникової класифікації, згідно:

- 1) На вимогу до кваліфікації обслуговуючого персоналу:
 - а) низький (АТДР);
 - б) високий (АТД, АТП ПЧ);
- 2) За простотою конструкції:
 - а) більш проста (АТД);
 - б) складніша (АТДР, АТД ПЧ);
- 3) За умовами ремонтпридатності:
 - а) найпростіша (АТД);
 - б) складніша (АТДР, АТД ПЧ);
- 4) За енергетичними показниками (ККД) двигуна:
 - а) високий (АТД ПЧ, АТД);
 - б) низький (АТДР);
- 5) За масогабаритними показниками:
 - а) менше (АТД ПЛ, АТД);
 - б) більше (АТДР);
- 6) По можливості регулювання швидкості:
 - а) висока (АТД ПЛ);
 - б) низька (АТДР, АТД);
- 7) За необхідною потужністю двигуна для приводу конкретного механізм:
 - а) менше (АТД ПЧ, АТД);
 - б) більше (АТДР);
- 8) За умовами надійності:
 - а) висока (АТД ПЧ, АТД);
 - б) низька (АТДР);
- 9) За рівнем вібрації та шуму при роботі приводу в механізмі:
 - а) знижений (АТД ПЧ, АТДР);
 - б) підвищений (АТД);
- 10) Вартість матеріалів та робіт:

а) низька (АТД);

б) висока (АТД ПЧ, АТД);

11) За умовами стабільності регулювання:

а) високі (АТП ПЧ);

б) низькі (АТДР, АТД);

12) По широті діапазону регулювання (частота, амплітуда):

а) ширший (АТП ПЧ);

б) менш широкий (АТДР, АТД);

13) По можливості позиціонувати якір:

а) високі (АТП ПЧ);

б) нижчі (АТДР, АТД);

14) За простотою схеми управління:

а) більш проста (АТД);

б) складніша (АТДР, АТД ПЧ);

15) По можливості підходу рухомої частини до зазначеної точки шляху із заданою швидкістю:

а) точніше управління (АТД ПЧ);

б) менш точний (АТДР, АТД).

Подаємо дані з п.п. 1..15 у вигляді двійникової матриці класифікованих характеристик, де 1 – попадання в групу "а" (перевага), а 0 – попадання в групу "б" (недолік). У матриці передбачений стовпець, що визначає число нулів у відповідному рядку, який фактично дає коефіцієнт унікальності конструкції.

Таблиця 1.1 – Матриця коефіцієнта унікальності конструкції

	АТДР	АТД	АТДПЧ	$K_{ун}$
1	2	3	4	5
1	0	1	0	2
2	0	1	0	2
3	0	1	0	2
4	0	1	1	1
5	0	1	1	1
6	0	0	1	2

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5
7	0	1	1	1
8	0	1	1	1
9	1	0	1	1
10	0	1	0	2
11	0	0	1	2
12	0	0	1	2
13	0	0	1	2
14	0	1	0	2
15	0	0	1	2

Облік коефіцієнтів $K_{ун}$, для конкретного типу двигуна, що фігурує в матриці, дозволяє скласти більш точну матрицю, в якій значуща бальна оцінка по кожному показнику визначається множенням одиниці з двійникової матриці на $K_{ун}$.

	АТДР	АТД	АТДПЧ
1	0	2	0
2	0	2	0
3	0	2	0
4	0	1	1
5	0	1	1
6	0	0	2
7	0	1	1
8	0	1	1
9	1	0	1
10	0	2	0
11	0	0	2
12	0	0	2
13	0	0	2
14	0	2	0
15	0	0	2

Підсумовування балів по вертикалі в матриці і віднесення отриманого результату до загальної суми балів всіх трьох типів двигунів дозволяє провести оцінку кожного з цих двигунів у відсотковому вираженні. Відповідно до

матриці теоретичних коефіцієнтів придатності для використання в сільському господарстві $(K_{cx})_T$ двигуна дорівнюватиме:

для АТДР $(K_{cx})_T = 4\%$,

для АТД $(K_{cx})_T = 46\%$,

для АТД ПЧ $(K_{cx})_T = 50\%$.

Висновки по розділу

З отриманих відсоткових виразів $(K_{cx})_T$ випливає, що найбільш вигідними для приводів зворотно-поступального руху сільськогосподарських механізмів є АТП ПЛ та АТД.

РОЗДІЛ 2

ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИВОДУ С/Г МАШИН ЗВОРОТНО-ПОСТУПАЛЬНОГО РУХУ НА ОСНОВІ ЛАД

У процесі експлуатації с/г машин зворотно-поступального руху на базі ЛАД необхідно мати можливість зміни амплітуди та частоти зворотно-поступального руху робочого органу с/г машин. С/г машини зворотно-поступального руху в основному характеризуються невеликою амплітудою (0,05-0,1 м), низькою частотою (2-5 Гц) та високою масою рухомої частини (100кг).

Необхідність зміни виникає через різні агротехнологічні властивості оброблюваної с/г продукції (вологість, призначення, сорт і т.д.) та агротехнічні вимоги до результату названого впливу.

При зміні частоти в модифікації приводу на базі ЛАД з однофазним частотним перетворювачем була відзначена така несприятлива характеристика двигуна, як зміщення в робочу область (рис. 2.1 і 2.2).

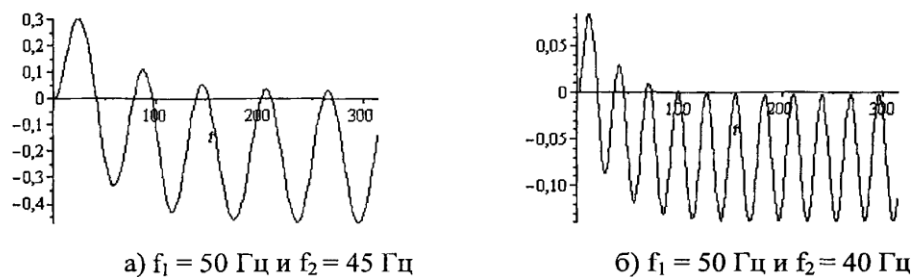


Рис. 2.1 Розрахункові осцилограми пуску ЛАД при зміні величини частоти напруги живлення в обмотках за 1 с.

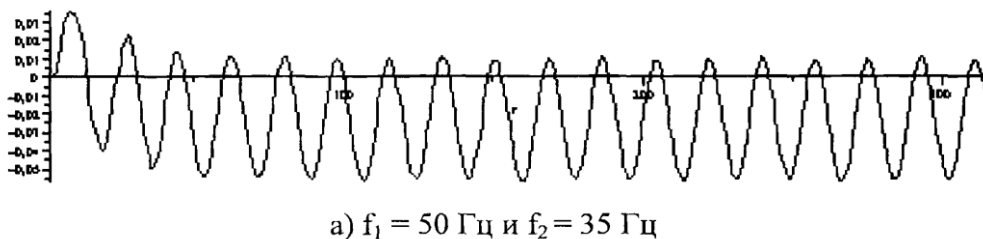


Рис. 2.2. Розрахункова осцилограма пуску ЛАД при зміні величини частоти напруги живлення в обмотках за 1 с.

Ця обставина викликає деякі складнощі при експлуатації с/г машин зворотно-поступального руху з електроприводом на базі ЛАД. При дослідженні використовувалися параметри лінійного електроприводу класифікатора проб стеблових кормів на основі ЛАД (потужність ЛАД 3,0 кВт; число пар полюсів = 2; максимальна кількість провідників у пазу = 100; активний опір = 1 Ом, індуктивність розсіювання = 0,00628 Гн індуктора, активний опір = 1 Ом, індуктивність розсіювання = 0,00628 Гн синусної фази індуктора, початкова фаза напруги живлення $\varphi_0=0$). Дослідження показали, що перехідний процес зміщення ЛАД у робочу область зворотно-поступального руху триває менше ніж 1 с. Встановлено залежність часу (рис. 2.3.) та величини (рис. 2.4) зміщення ЛАД у робочу область від величини частоти напруги на виході однофазного частотного перетворювача (f_2) при незмінній частоті напруги живлення ($f_i=50$ Гц – const). Дану обставину необхідно враховувати при розробці електроприводу с/г машин на базі ЛАД із різночастотним живленням обмоток. Очевидно, що за названих умов конструкція електроприводу с/г машин з різночастотним живленням обмоток, при яких вторинний елемент ЛАД – безпосередньо корпус с/г машин, є кращим через зменшення впливу на масогабаритні показники приводу, зміщення ЛАД в робочу область.

Здійснення зміни частоти та амплітуди коливань вторинного елемента ЛАД простіше реалізувати в модифікації приводу з різночастотним живленням обмоток з огляду на залежність встановлену для дослідження математичної моделі (рис. 2.5) . З графіків видно, що зі збільшенням значення частоти напруги на виході однофазного частотного перетворювача (f_2) відбувається збільшення амплітуди коливань вторинного елемента (A), а також зменшення частоти коливань. Беручи до уваги, що в с/г машинах зворотно-поступальний рух характеризуються невеликою частотою зворотно-поступального руху робочих органів і невеликою амплітудою, доцільно застосовувати значення $f_2 = 45$ Гц. При аналізі (рис. 2.6) було встановлено, що значення варіювання частоти на виході однофазного частотного перетворювача знаходиться в діапазоні від

49 до 33 Гц. При значенні частоти на виході однофазного частотного перетворювача менше 33 Гц зворотно-поступальний рух вторинного елемента ЛАД не відповідає агротехнічним вимогам, що висуваються до с/г машин з зворотно-поступальним рухом робочих органів (рис. 2.6).

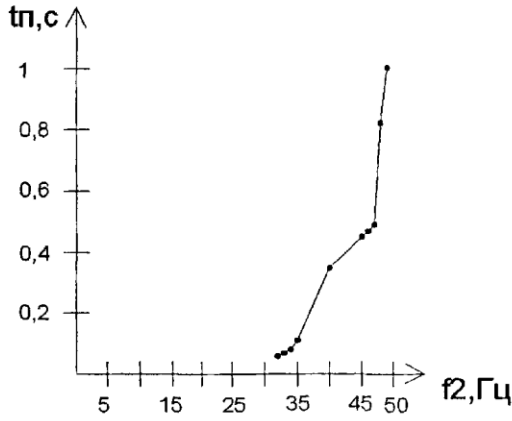


Рис. 2.3. Залежність $t_{\Pi}(f_2)$

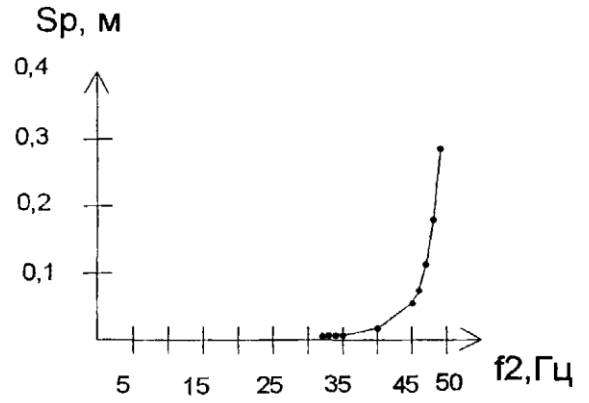


Рис. 2.4. Залежність $S_{\Pi}(f_2)$

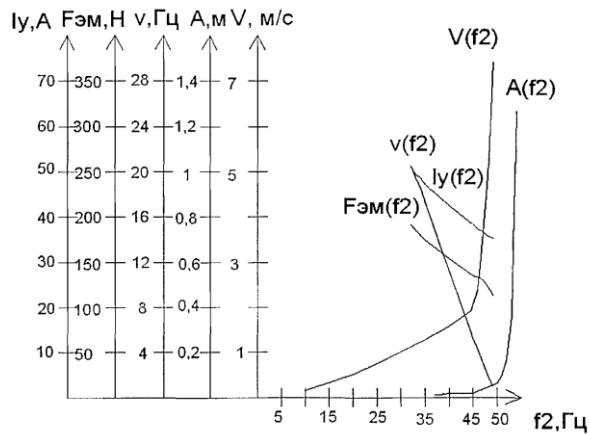


Рис. 2.5. Залежність параметрів зворотно-поступального руху вторинного елемента ЛАД при зміні величини частоти напруги живлення в обмотках

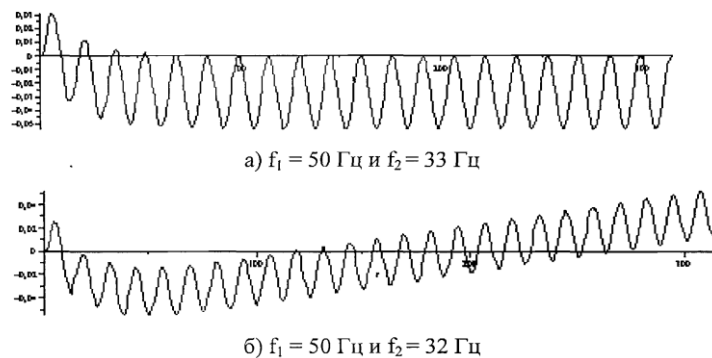
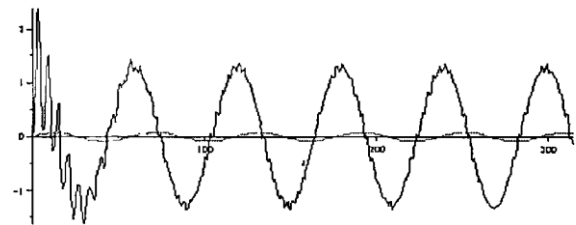


Рис. 2.6. Розрахункові осцилограми пуску ЛАД при зміні величини частоти напруги живлення в обмотках за 1 с.

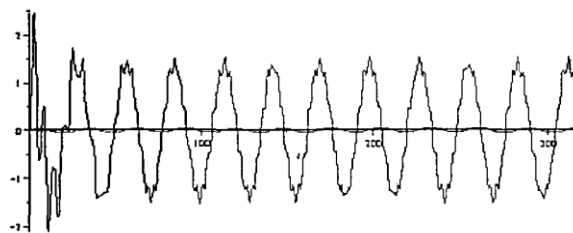
На рис. 2.7 представлені графіки залежності швидкості руху (V) та тягового зусилля (F) вторинного елемента ЛАД від часу (t) при різних значеннях величини частоти на виході однофазного частотного перетворювача (f_2). З представлених графіків видно, що при збільшенні значення частоти напруги (f_2) спостерігається зниження ударного значення тягового зусилля і тягового зусилля у встановленому режимі роботи ЛАД. Одночасно відзначається відповідне збільшення швидкості руху вторинного елемента. Залежність максимального електромагнітного зусилля F_{\max} (f_2), електромагнітного зусилля в режимі F (f_2) і швидкості V (f_2) представлені на рис. 2.8.



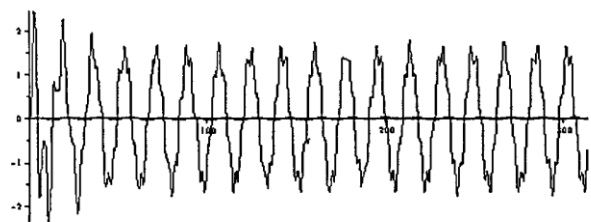
а) $f_1 = 50$ Гц и $f_2 = 49$ Гц



б) $f_1 = 50$ Гц и $f_2 = 45$ Гц



в) $f_1 = 50$ Гц и $f_2 = 40$ Гц



г) $f_1 = 50$ Гц и $f_2 = 35$ Гц

Рис. 2.7. Розрахункова осцилограма пуску ЛАД при зміні величини частоти напруги живлення в обмотках за 1 с.

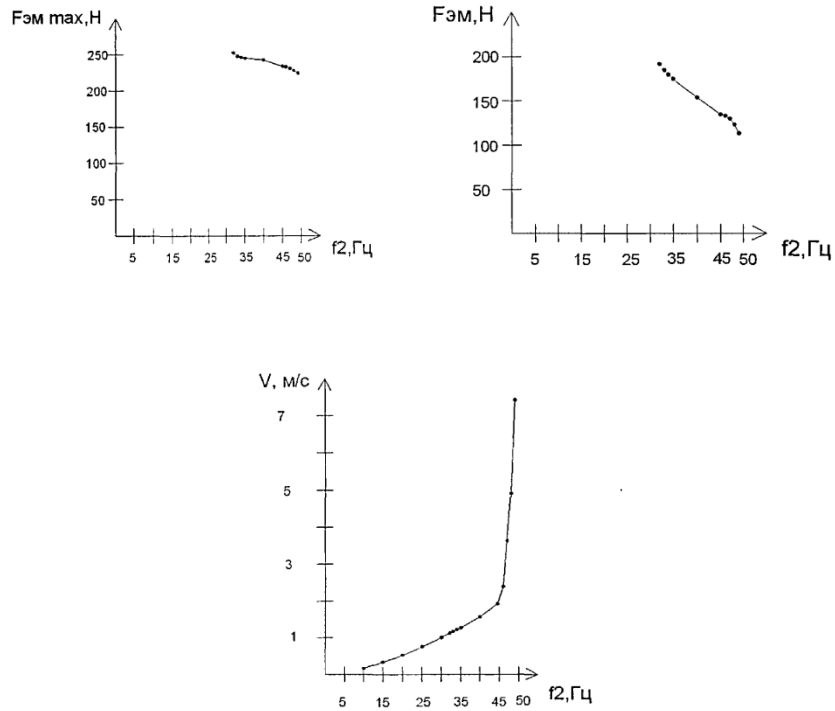
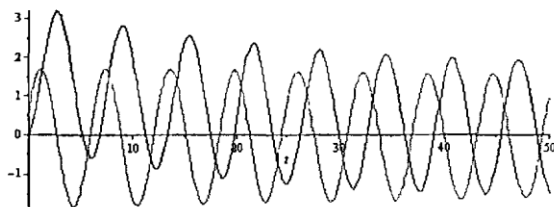
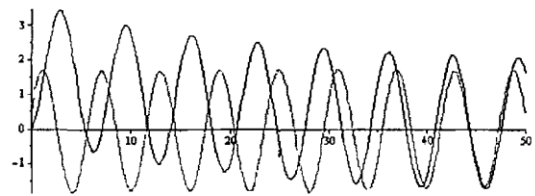


Рис. 2.8. Залежність F_{\max} (f_2) F (f_2) V (f_2).

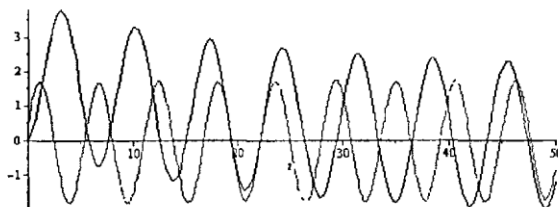
На рис. 2.9 представлені графіки залежності струмів індуктора ЛАД від часу (t) при різних значеннях величини частоти на виході однофазного частотного перетворювача (f_2).



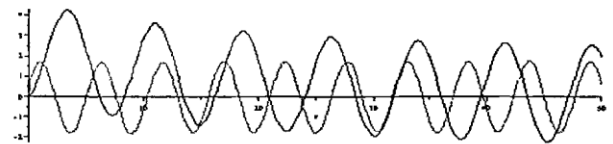
а) $f_1 = 50$ Гц и $f_2 = 49$ Гц



б) $f_1 = 50$ Гц и $f_2 = 45$ Гц



в) $f_1 = 50$ Гц и $f_2 = 40$ Гц



г) $f_1 = 50$ Гц и $f_2 = 35$ Гц

Рис. 2.9. Розрахункова осцилограма пуску ЛАД при зміні величини частоти напруги живлення в обмотках за 0,16 с.

Як і слід очікувати зі зменшенням значення частоти на виході з однофазного частотного перетворювача, ударний струм (I_y) і струм індуктора в косинусній обмотці (I_{\cos}) зменшується. Одночасно відбувається незначне збільшення струму індуктора у синусній обмотці (I_{\sin}).

Висновки по розділу

Зміна амплітуди та частоти коливань вторинного елемента приводу с/г машини на базі ЛАД з різночастотним живленням обмоток здійснюється простіше і швидше, ніж у приводу с/г машин на базі зі зворотною пружиною, що зменшує час простою технологічного обладнання.

Рекомендовано застосовувати частоту напруги на виході однофазного частотного перетворювача в межах від 49 Гц до 33 Гц. Зниження зазначеної частоти нижче вказаної межі призводить до появи зворотно-поступального руху робочого органу с/г машин, що не відповідає агротехнологічним вимогам.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЙ С/Г МАШИНИ ЗВОРОТНО-ПОСТУПАЛЬНОГО РУХУ З ЛАД.

Метою зміни приводу с/г машин є спрощення технічної реалізації приводу з урахуванням ЛАД.

Поворотно-поступальний рух робочого органу с/г машин здійснюється завдяки тому, що він пов'язаний або є вторинним елементом ЛАД, що здійснює лінійні поступальні рухи під дією поля індуктора ЛАД. При цьому одна обмотка трифазного ЛАД з'єднана з мережею змінного струму, дві інші включені послідовно і з'єднані з виходом однофазного частотного перетворювача. При подачі живлення на ЛАД відбувається поступальне переміщення вторинного елемента. Однофазний частотний перетворювач дає можливість змінювати амплітуду та частоту зворотно-поступального руху робочого органу с/г машини, за рахунок зміни різниці частот між двома напругами живлення. При цьому можна підбирати такі значення частоти та амплітуди коливань, які є найбільш сприятливими в даному технологічному процесі. Це дозволяє, своєю чергою, істотно підвищити якість одержуваної продукції.

Необхідність зміни частоти зворотно-поступального руху за допомогою однофазного частотного перетворювача виникає в залежності від виду, сорту, вологості сільськогосподарської продукції, що підлягає технологічній обробці.

З цього випливає, що існує можливість регулювання частоти зворотно-поступального руху робочих органів с/г машин та отримання таких значень частот, при яких досягається найвищий технологічний ефект, що дозволяє у свою чергу, суттєво підвищити техніко-економічні показники с/г машин .

Завдяки застосуванню у приводі с/г машин трифазного ЛАД, вторинним елементом якого є робочий орган с/г машин, здійснюється безпосередній привід названих машин. Це спрощує кінематичну схему приводу, підвищує

надійність та коефіцієнт корисної дії, знижує масу, габарити та вартість с/г машин.

На рис. 3.1. представлений загальний вигляд приводу із різночастотним живленням обмоток.

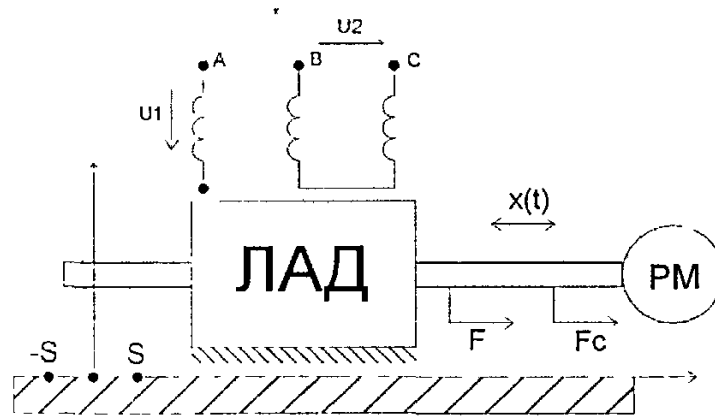


Рис. 3.1. Загальний вид приводу с машин на базі ЛАД з різночастотним живленням обмоток.

Для перетворення поступального руху трифазного ЛАД у зворотно-поступальний рух робочого органу с/г машин обмотка трифазного ЛАД підключена до мережі живлення через систему управління (СУ) двигуном, а до с/г машині, приєднана пружина, закріплена на нерухомій опорі. При подачі живлення на обмотку трифазного ЛАД він переміщає вторинний елемент, розтягуючи закріплену пружину. При досягненні с/г машини заданого СУ положення, сигналу датчика СУ відключає обмотку трифазного ЛАД від мережі. За рахунок запасеної пружиною потенційної енергії при переміщенні робочий орган с/г машини повертається в початкове положення, при цьому з датчика СУ надходить сигнал включення живлення на обмотку трифазного ЛАД. Далі цей цикл роботи повторюється. Таким чином, СУ дає можливість змінювати амплітуду та частоту зворотно-поступального руху робочого органу с/г машини за рахунок налаштування моменту включення та відключення трифазного ЛАД, а отже і отримувати такі значення частоти та амплітуди зворотно-поступального руху, за яких досягаються необхідні технологічні

параметри сільськогосподарського виробництва, що дозволяє у свою чергу, суттєво підвищити коефіцієнт корисної дії названих машин.

Необхідність зміни частоти коливань робочого органу сільськогосподарської машини виникає залежно від виду, сорту, вологості оброблюваної продукції сільського господарства.

Наявність у кінематичній схемі приводу пружини дозволяє зменшити споживану з мережі електроенергію за рахунок повернення робочого органу в початкове положення під дією потенційної енергії пружини.

Завдяки застосуванню в приводі с/г машини трифазного лінійного асинхронного двигуна, вторинним елементом якого є робочий орган с/г машини здійснюється безпосередній привід с/г машини.

Це спрощує кінематичну схему приводу, підвищує надійність та коефіцієнт корисної дії, знижує масу, габарити та вартість с/г машини.

На рис.4.2. представлений загальний вигляд приводу зі зворотною пружиною.

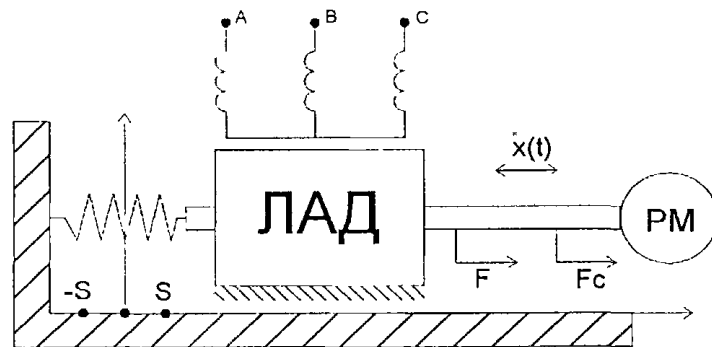


Рис. 3.2. Загальний вид приводу на базі ЛАД із зворотною пружиною.

З результатами дослідження запропонована конструкція вібропневмосепаратора. Дані конструктивні рішення відрізняються загальною конструкцією самого механізму вібропневмосепаратора, але різна конструкція приводу на базі ЛАД, а також і різне виконання його вторинного елемента. Прийняті конструктивні рішення базуються на відомій у країні конструкції вібропневмосепаратора. Метою зміни конструкції вібропневмосепаратора є створення безпосереднього приводу на базі ЛАД для покращення техніко-

економічних показників (зниження вартості, габаритних розмірів та маси приводу, підвищення коефіцієнта корисної дії, надійності та продуктивності зерноочисної установки). Запропоновано два конструктивні виконання приводу вібропневмосепаратора на базі ЛАД:

- 1) вторинний елемент ЛАД – тяга,
- 2) вторинний елемент ЛАД - віброжолоб.

Вібропневмосепаратор на базі ЛАД із зворотною пружиною. Поставлена мета досягається тим, що вібропневмосепаратор з прямоточним деком, що містить корпус, забезпечений приймальним бункером, вакуумною камерою, ділянком псевдозрідженого шару, приймачами фракцій насіння, прямоточним деком, до якої жорстко закріплені хитаючі опори, електродвигун, з пружиною один кінець якого з'єднаний з корпусом, а другий кінець закріплений на нерухомій опорі, системою управління двигуном, вхід якої з'єднаний з трифазною мережею змінного струму, а електродвигун здійснює лінійний поступальний рух і виконаний у вигляді трифазного лінійного асинхронного двигуна, вторинним трифазним елементом лінійного асинхронного двигуна, є тяга, жорстко пов'язана з корпусом і розташована з боку приводу (рис. 3.3) або безпосередньо корпус вібропневмосепаратора (рис. 3.4), при цьому обмотка трифазного лінійного асинхронного двигуна з'єднана з виходом системи керування двигуном.

Завдяки тому, що вібропневмосепаратор з прямоочною декою забезпечений пружиною, а електродвигун здійснює лінійний поступальний рух і виконаний у вигляді трифазного лінійного асинхронного двигуна, причому вторинним елементом трифазного лінійного асинхронного двигуна, є тяга (рис. 3.3) або корпус вібросепаратора відбувається поліпшення техніко-економічних показників (знижується маса та габарити, здешевлюється привід, підвищується надійність та продуктивність роботи вібропневмосепаратора з прямоточним деком).

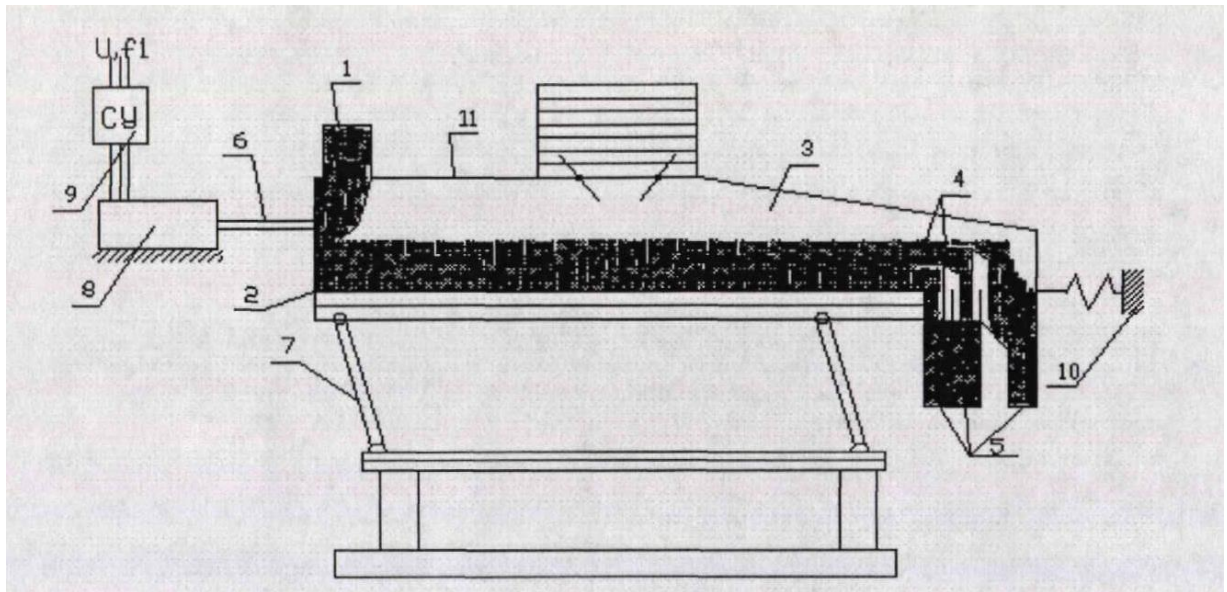


Рис. 3.3. Вібропневмосепаратор на базі ЛАД (вторинний елемент – тяга): 1 – приймальний бункер; 2 – дека; 3 – вакуумна камера; 4 – дільник псевдозрідженого шару; 5 – приймачі фракцій насіння; 6 – тяга; 7 – хитаючі опори; 8 – лінійний асинхронний двигун; 9 – система керування двигуном; 10 – поворотна пружина; 11 – корпус.

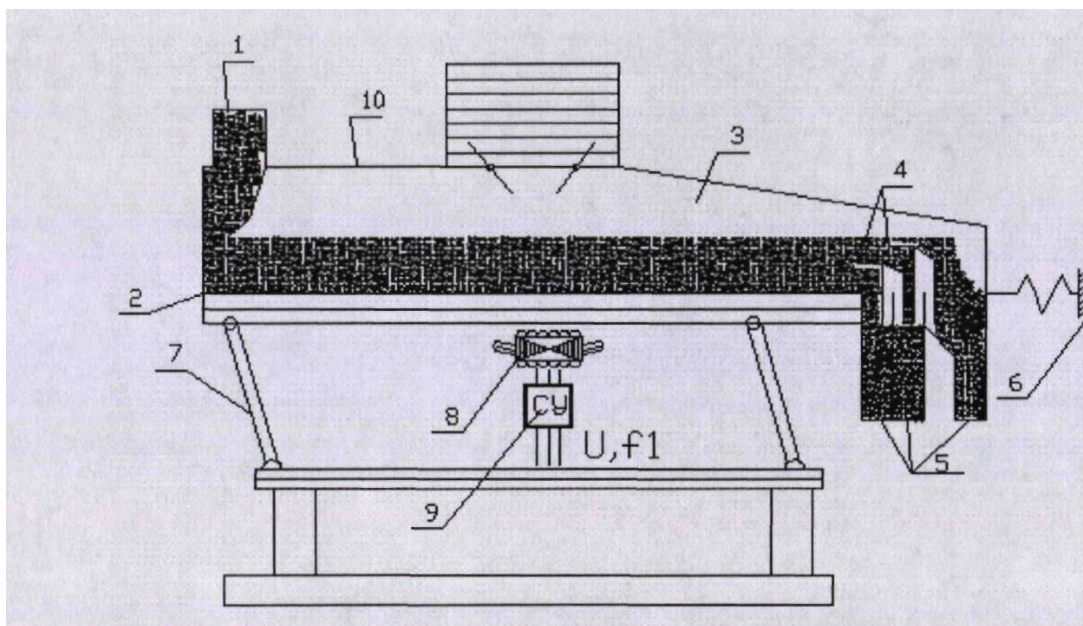


Рис. 3.4. Вібропневмосепаратор на базі ЛАД (вторинний елемент – корпус вібропневмосепаратора): 1 – приймальний бункер; 2 – дека; 3 – вакуумна камера; 4 – дільник псевдозрідженого шару; 5 – приймачі фракцій насіння; 6 – поворотна пружина; 7 – хитаючі опори; 8 – лінійний асинхронний двигун; 9 – система керування двигуном; 10 – корпус.

Вібропневмосепаратор на базі ЛАД з однофазним частотним перетворювачем. Поставлена мета досягається тим, що вібропневмосепаратор з прямоточним деком, який містить корпус, з приймальним бункером, вакуумною камерою, дільником псевдозрідженого шару, приймачами фракцій насіння, прямоточною декою, до якої жорстко закріплені коливаючі опори, електродвигун, забезпечений однофазним частотним перетворювачем, вхід якого з'єднаний з мережею змінного струму, а електродвигун здійснює лінійний поступальний рух і виконаний у вигляді трифазного лінійного асинхронного двигуна, вторинним елементом є тяга, жорстко пов'язана з корпусом і розташована з боку приводу (рис. 3.5) або корпус вібропневмосепаратора (рис. 3.6), при цьому одна обмотка лінійного трифазного асинхронного двигуна з'єднана з мережею змінного струму, а дві інші включені послідовно і з'єднані з виходом однофазного частотного перетворювача.

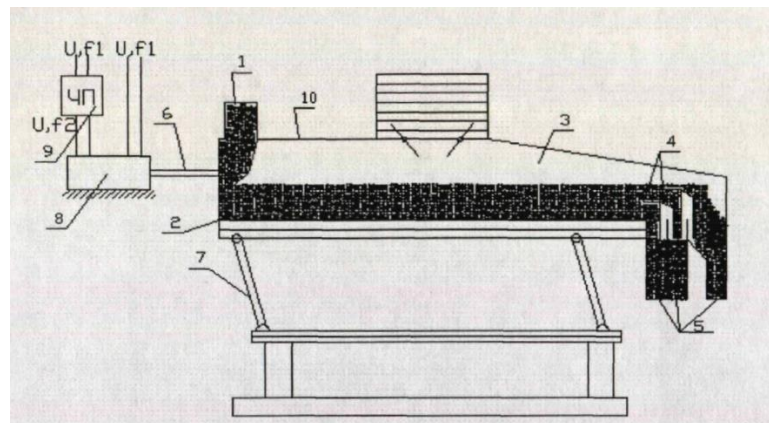


Рис. 3.5. Вібропневмосепаратор з урахуванням ЛАД (вторинний елемент тяга): 1 – приймальний бункер; 2 – дека; 3 – вакуумна камера; 4 – дільник псевдозрідженого шару; 5 – приймачі фракцій насіння; 6 – тяга; 7 – хитаючі опори; 8 – лінійний асинхронний двигун; 9 – однофазний частотний перетворювач; 10 – корпус

Завдяки тому, що вібропневмосепаратор з прямоточним деком забезпечений однофазним перетворювачем частоти, а електродвигун здійснює лінійний поступальний рух і виконаний у вигляді трифазного лінійного

асинхронного двигуна, відбувається поліпшення техніко-економічних показників (знижується маса і габарити, здешевлюється прямоточною декою).

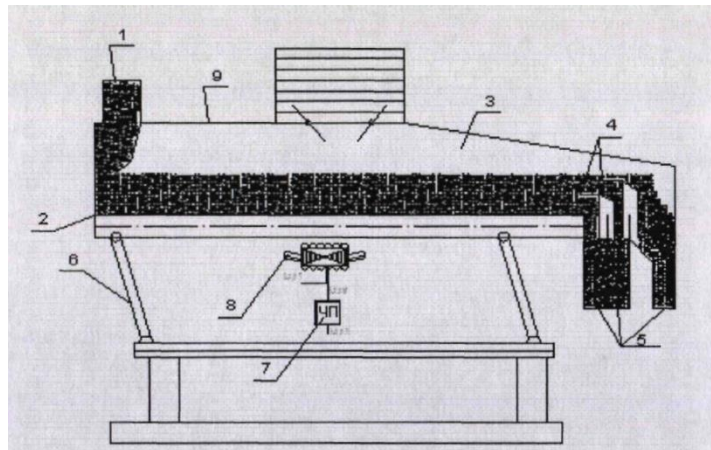


Рис. 3.6. Вібропневмосепаратор на базі ЛАД (вторинний елемент – корпус вібропневмосепаратора): 1 – приймальний бункер; 2 – дека; 3 – вакуумна камера; 4 – ділянка псевдозрідженого шару; 5 – приймачі фракцій насіння; 6 – хитаючі опори; 7 – однофазний частотний перетворювач; 8 – лінійний асинхронний двигун; 9 – корпус.

Висновки по розділу

Запропоновані конструкції приводу дозволяють отримати найбільш сприятливі технологічні параметри роботи с/г машин (швидкість, частота, амплітуда зворотно-поступального руху).

При використанні безпосереднього електроприводу на базі ЛАД можливе отримання простим та економічним способом низьких параметрів частоти та амплітуди зворотно-поступального руху, які найбільше затребувані у с/г машинах.

Запропонований лінійний електропривід відрізняє від традиційного приводу зворотно-поступального руху високими динамічними показниками.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Виявлено основні переваги лінійного електроприводу на базі ЛАД. Встановлено, що модифікації електроприводу зворотно-поступального руху на базі ЛАД не знаходять досить широкого застосування. Визначено коефіцієнт придатності $(K_{ce})_T$ електроприводів для використання в сільському господарстві для отримання зворотно-поступального руху, який дорівнює: для лінійного електроприводу з різночастотним живленням обмоток $(K_{ce})_m=4\%$, для лінійного електроприводу зі зворотною пружиною $(K_{cx})_m=46\%$, для ЛАД із різночастотним живленням $(K_{cx})_m=50\%$. Встановлено, що найбільш ефективним для приводу зворотно-поступального руху с/г машин є лінійний електропривод на основі ЛАД.

Найбільший вплив на амплітуду і частоту зворотно-поступального руху робочого органу с/г машин має величина різниці частот напруги живлення. При $f_2=45$ Гц $A=0,06$ м, $v=5$ Гц, а при $f_2=35$ Гц, $A=0,02$ м, $v=15$ Гц (для ЛАД потужність 3,0 кВт).

Розроблено конструкції вібропневмосепаратора на базі ЛАД з різночастотним живленням обмоток та поворотною пружиною. Запропоновані конструкції дозволяють повністю реалізувати функції кривошипно-шатунного механізму, як перетворювача руху та виключити його з кінематичної схеми, завдяки чому відбувається спрощення технічної реалізації приводів с/г машин.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Жулай Є.Л., Зайцев Б.В. та ін. Електропривід сільськогосподарських машин, агрегатів та потокових ліній. Підручник. Київ:: Вища освіта, 2001. 288 с.
2. Ніколаєнко А.М. Технічні засоби автоматизації. Запоріжжя: ЗДІА, 2013. 322 с.
3. Утегулов Б.Б., Кешуов С.А., Копырин В.С., Марковский В.П. Элементы систем автоматизированного электропривода сельскохозяйственных машин, агрегатов и поточных линий. Павлодар: ПГУ им. С. Торайгырова, 2004. 200 с.
4. Araújo R.E. (ed.) Induction Motors: Modelling and Control. Rijeka: InTech, 2012. 557 p.
5. Антонов С.Н., Данилов Д.В. Проектирование электропривода сельскохозяйственного назначения. Ставрополь: Агрус, 2010. 272 с.
6. Оськин С.В. Автоматизированный электропривод. Краснодар: КРОН, 2014. 513 с.
7. Barnes M. Practical Variable Speed Drives and Power Electronics. Newnes, 2003. 286 p
8. Chomat M. (ed.) New Applications of Electric Drives. AvE4EvA, 2015. 185 p.
9. El-Sharkawi M.A. Fundamentals of Electric Drives. 2nd Edition. Cengage Learn, 2019.
10. Hameyer K., Belmans R. Numerical Modelling and Design of Electrical Machines and Devices. WIT Press, 1999. 340 p.
11. Recalde R.I.G. Induction Motors: Applications, Control and Fault Diagnostics. AvE4EvA, 2015. 381 p.
12. Jufer M. Electric Drive: Design Methodology. Wiley-ISTE, 2010. 225 p.

13. Lipo T. Introduction to AC Machine Design. Wiley – IEEE Press, 2017. 544 p.
14. Thomson W., Culbert I. Current Signature Analysis for Condition Monitoring of Cage Induction Motors: Industrial Application and Case Histories. Wiley-IEEE Press, 2017. 427 p.