

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ПОГОДЖЕНО

**Директор ННІ енергетики,
автоматики і енергозбереження**

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

**Завідувач кафедри
електротехніки, електромеханіки
та електротехнологій**

проф., д.т.н. /КАПЛУН В.В./
вчене звання, науковий ступінь підпис

” ” 2026 р.
число місяць рік

доц., к.т.н. /ОКУШКО О.В./
вчене звання, науковий ступінь підпис

” ” 2026 р.
число місяць рік

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на тему: **„ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА**
ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ПЕРЕДПОСІВНОЇ
ОБРОБКИ НАСІННЯ В МАГНІТНОМУ ПОЛІ”

Спеціальність 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова

Гарант освітньої програми

к.т.н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Троханяк В.І.

(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

к.т.н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Савченко В.В.

(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Котенко В.В.

(ПІБ)

КИЇВ – 2026

ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ
Котенку Владиславу Володимировичу

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи _____ **Савченко В.В.**
(підпис) (ПБ)

Завдання прийняв до виконання _____ **Котенко В.В.**
(підпис) (ПБ)

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота: 86 с., 33 рис., 8 табл., 44 джерела.

Об'єкт дослідження –технологічний процес передпосівної обробки насіння в магнітному полі.

Предмет дослідження – закономірності функціонування електротехнологічного комплексу передпосівної обробки насіння в магнітному полі.

Методи дослідження та апаратура: дослідження просторово-енергетичних характеристик магнітного поля пристрою для обробки насіння виконувалися з використанням спеціалізованого програмного комплексу ELCUT. Лабораторні експериментальні дослідження проводилися на спеціально розробленій установці із застосуванням методів планування експерименту. Обробка отриманих результатів здійснювалася із використанням математико-статистичних методів аналізу даних на ПЕОМ, зокрема регресійного та дисперсійного аналізу, у програмних середовищах Mathcad 2001 Professional, Curve Expert 1.3 та Advanced Grapher.

Експериментально встановлено вплив магнітного поля на показники енергії проростання та схожості насіння зернових культур, інтенсивність водопоглинання та біометричні характеристики проростків. Отримані результати дозволили визначити оптимальні режими магнітної обробки насіння.

Обґрунтовано параметри та розроблено електротехнологічний комплекс для передпосівної обробки насіння в магнітному полі, а також проведено його експериментальне дослідження в лабораторних умовах.

Додатково виконано дослідження електроприводу електротехнологічного комплексу, що дозволило оцінити його працездатність та відповідність вимогам технологічного процесу.

Галузь застосування – сільське господарство.

Ключові слова: *передпосівна магнітна обробка насіння, електромагнітне поле, енергія проростання насіннєвого матеріалу, польова схожість, біометричні показники проростків, електропривод, електротехнологічний комплекс*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРЕДПОСІВНОЇ ОБРОБКИ НАСІННЯ В МАГНІТНОМУ ПОЛІ І ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ЇЇ РЕАЛІЗАЦІЇ	11
1.1. Вплив магнітного поля на насіння сільськогосподарських культур	11
1.2. Аналіз технічних засобів передпосівної обробки насіння сільськогосподарських культур в магнітному полі.....	16
Рис. 1.4. Установа для передпосівної обробки насіння	21
РОЗДІЛ 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА НАСІННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР	29
2.1 Лабораторна установа для проведення експериментальних досліджень впливу магнітного поля на насіння зернових культур.....	29
2.2. Методика експериментальних досліджень впливу магнітного поля на насіння зернових культур	30
2.3. Методика визначення ефекту магнітної обробки насіння.....	32
2.4. Експериментальні дослідження зміни біопотенціалу насіння зернових культур при передпосівній обробці в магнітному полі	36
2.5. Експериментальні дослідження зміни водопоглинання насіння зернових культур при передпосівній обробці в магнітному полі	39
2.5. Експериментальні дослідження зміни енергії проростання і схожості насіння зернових культур при передпосівній обробці в магнітному полі.....	41
2.7. Вплив замочування насіння в магнітоактивованій воді на енергію проростання і схожість насіння при передпосівній обробці в магнітному полі.....	48
2.8. Зміна енергії проростання і схожості насіння в часі після обробки в магнітному полі.....	49
2.9. Вплив магнітного поля на біометричні показники зернових культур	50
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ПЕРЕДПОСІВНОЇ ОБРОБКИ НАСІННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР У МАГНІТНОМУ ПОЛІ.....	52

3.1. Обґрунтування структури електротехнологічного комплексу для передпосівної обробки насіння сільськогосподарських культур у магнітному полі	52
3.2. Моделювання магнітного поля та обґрунтування геометрії пристрою для магнітної обробки з періодичною магнітною системою	53
3.3. Експериментальні дослідження електротехнологічного комплексу для передпосівної обробки насіння сільськогосподарських культур у магнітному полі	58
3.4. Дослідження електропривода транспортера електротехнологічного комплексу для передпосівної обробки насіння в магнітному полі.....	61
3.4.1. Визначення тягового зусилля на приводному барабані та потужності електродвигуна.....	61
3.4.2. Дослідження приводних характеристик двигуна	65
3.4.3. Дослідження відхилення кутової швидкості двигуна при передпосівній обробці насіння в магнітному полі	69
ВИСНОВКИ.....	78
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	82

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

B – магнітна індукція;

E – енергія;

m – маса;

ρ – густина;

V – об'єм;

G – схожість;

v – швидкість;

β – жорсткість механічної характеристики електродвигуна;

F – сила;

M – момент двигуна;

M_c – момент статичних опорів робочої машини;

t – час.

ВСТУП

Нині проблема підвищення посівних якостей насіння, збільшення врожайності сільськогосподарських культур та отримання екологічно безпечної продукції набуває особливої актуальності. Підвищення ефективності рослинництва можливе шляхом стимуляції насіннєвого матеріалу на основі реалізації його природного біологічного потенціалу, а також за рахунок зменшення втрат урожаю, спричинених хворобами та шкідниками.

У традиційній агротехнології основним способом підвищення врожайності є застосування мінеральних добрив, а захист рослин від шкідливих організмів здійснюється переважно за рахунок хімічних засобів захисту. Використання інтенсивних технологій із внесенням добрив і пестицидів у комплексі з обробітком ґрунту дозволяє досягати рівня продуктивності 70–80 % від генетичного потенціалу сортів. Водночас це супроводжується негативними екологічними наслідками, зокрема зниженням родючості ґрунтів і накопиченням шкідливих речовин у агроєкосистемах.

У зв'язку з цим зростає інтерес до екологічно безпечних методів стимуляції насіння, спрямованих на підвищення врожайності, поліпшення якості продукції та її збереження. Особливу увагу приділяють електрофізичним методам впливу, зокрема обробці насіння, бульб, цибулин і проростків на різних етапах розвитку.

Одним із перспективних напрямів є застосування магнітних полів, які здатні впливати на біологічні об'єкти безпосередньо, проникаючи у їхній об'єм без потреби у проміжних перетвореннях енергії.

На сьогодні магнітна обробка використовується для передпосівної стимуляції насіння, активізації ростових процесів, підвищення стійкості рослин до хвороб, а також для модифікації властивостей води і живильних розчинів з метою підвищення їх біологічної активності.

Разом із тим широке впровадження магнітних технологій у сільськогосподарське виробництво стримується низкою факторів. Основною проблемою є недостатня відтворюваність експериментальних результатів та значна варіативність даних, що

свідчить про неповне розуміння механізмів впливу магнітного поля на біологічні системи.

Встановлення зв'язку між режимними параметрами обробки та електрофізичними процесами в насінні, а також розробка відповідних технічних засобів дозволить сформулювати науково обґрунтований підхід до технології магнітної стимуляції. Особливого значення набуває дослідження механізмів дії магнітного поля, що дасть змогу підвищити ефективність обробки насіннєвого матеріалу.

Впровадження технологій магнітної стимуляції потребує створення електротехнологічних комплексів, обґрунтування їх параметрів та режимів роботи, що забезпечують підвищення врожайності та покращення якості продукції, і визначає актуальність даного дослідження.

Метою дослідження є встановлення режимних параметрів обробки насіння у магнітному полі та розроблення і дослідження технічних засобів з електроприводом для їх реалізації.

Об'єкт дослідження – технологічний процес передпосівної обробки насіння в магнітному полі.

Предмет дослідження – закономірності функціонування електротехнологічного комплексу передпосівної обробки насіння в магнітному полі.

Досягнення мети базується на вирішенні таких завдань:

- провести аналіз технічних засобів для передпосівної обробки насіння в магнітному полі,
- дослідити зміну посівних якостей насіння, біометричних показників та врожайності від режимних параметрів обробки насіння в магнітному полі та встановити закономірність їх зміни протягом періоду післядії;
- обґрунтувати режими обробки та параметри електротехнічного комплексу для передпосівної обробки насіння в магнітному полі;
- розробити та дослідити електропривод електротехнологічного комплексу передпосівної обробки насіння зернових культур для використання в технологіях стимуляції насіння та дати техніко-економічне обґрунтування його застосування.

Методи дослідження. Дослідження параметрів магнітного поля пристрою для магнітної обробки насіння виконанні з використанням спеціалізованого програмного забезпечення ELCUT. Експериментальні дослідження проводилися в лабораторних умовах на спеціально розробленій установці з використанням методів планування експерименту. Обробка результатів експериментальних досліджень здійснювалася математико-статистичними методами на ПЕОМ з використанням регресійного і дисперсійного методів аналізу у математичному програмному середовищі “Mathcad 2001 Professional”, “Curve Expert 1,3”, “Advanced Grapher”. Вірогідність досліджень може бути визнана достатньою, оскільки при обробці експериментальних даних відносне відхилення показників не перевищувало 5 %, що відповідає загальноприйнятому у практиці наукових досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів:

- встановлено взаємозв'язок між енергією проростання, схожістю, водопоглинанням насіння, біометричними показниками рослин, врожайністю та режимними параметрами обробки в магнітному полі, що дало змогу визначити найбільш ефективний режим передпосівної обробки насіння в магнітному полі;
- проведені дослідження електропривода електротехнологічного комплексу для передпосівної обробки насіння в магнітному полі.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблений електротехнологічний комплекс, основними складовими якого є пристрій для обробки насіння з постійними магнітами та транспортер, обґрунтовані режими обробки дають практичну можливість використання магнітного поля в електротехнологічних системах обробки насіння сільськогосподарських культур.

У цій магістерській кваліфікаційній роботі експериментально встановлено вплив магнітного поля на енергію проростання і схожість насіння зернових культур, водопоглинання насіння та біометричні показники паростків, що дозволило встановити найбільш ефективний режим обробки. Обґрунтовані параметри та розроблений електротехнологічний комплекс для передпосівної обробки насіння в магнітному полі та проведені його дослідження. Проведені дослідження

електропривода електротехнологічного комплексу для передпосівної обробки насіння в магнітному полі.

Публікації. 1. Котенко В.В. Передпосівна обробка насіння зернових культур у магнітному полі. Тези доповідей 78-ої науково-практичної конференції студентів «Енергозабезпечення, електротехнології, електротехніка та інтелектуальні управляючі системи в АПК», м. Київ, 24 квітня 2025 р. С.45.

2. Котенко В.В. Вплив магнітного поля на насіння сільськогосподарських культур. Тези доповідей 79-ої науково-практичної конференції студентів «Енергозабезпечення, електротехнології, електротехніка та інтелектуальні управляючі системи в АПК», м. Київ, 30 квітня 2026 р. С.108.

РОЗДІЛ 1

ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРЕДПОСІВНОЇ ОБРОБКИ НАСІННЯ В МАГНІТНОМУ ПОЛІ І ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ЇЇ РЕАЛІЗАЦІЇ

1.1. Вплив магнітного поля на насіння сільськогосподарських культур

Вчені висловлюють припущення, що під дією магнітного поля в структурі насіння можуть частково послаблюватися або перебудовуватися хімічні зв'язки, що сприяє утворенню іонізованих частинок, зокрема активних форм із надлишковою енергією — вільних радикалів. Збільшення кількості таких реакційноздатних структур у насінні може бути пов'язане з підвищенням енергії його проростання [1].

Як зазначають Н. В. Ксенз та інші дослідники [2], ключову роль у процесах проростання відіграють так звані «стартові» біохімічні реакції та проміжні метаболічні продукти, що формуються в зародкових тканинах насіння на ранніх етапах розвитку.

Вплив магнітних полів, як вважається, значною мірою реалізується через дію на клітинні мембрани. Поляризація мембранних структур під впливом магнітного поля може активізувати ферментативні системи та змінювати їх функціональну активність. Одночасно спостерігається підвищення проникності насінневих оболонок, що сприяє інтенсивнішому надходженню води та кисню в насіння. Це активізує гідролітичні та окисно-відновні ферментні системи [3], забезпечуючи більш ефективне транспортування поживних речовин до зародка, прискорення клітинного поділу та загальну активацію ростових процесів. У рослин, отриманих із обробленого насіння, інтенсивніше формується коренева система та швидше запускається фотосинтетична активність, що створює сприятливі умови для подальшого розвитку і підвищення продуктивності [4].

Ефекти магнітного поля на біологічні об'єкти реалізуються переважно в приповерхневих мембранних шарах і залежать від швидкості руху іонів, тривалості дії поля та розмірних характеристик клітин. Хоча прийнято вважати, що електромагнітне поле впливає через мембранні потенціали, його зовнішня складова є

значно меншою за внутрішні електричні процеси, включаючи власні шумові коливання клітини [5].

Разом із тим, за даними Т. С. Ніжарадзе, навіть слабкі постійні магнітні поля можуть викликати специфічні біологічні ефекти, пов'язані з нестаціонарними процесами і повільним рухом іонів. У таких умовах визначальним чинником є не потенціальний перепад, а провідність іонного середовища, яка підсилює чутливість системи до слабких зовнішніх впливів.

Експериментально встановлено, що магнітне поле здатне впливати на біоб'єкти без суттєвого підвищення температури насіння, тобто реалізуються нетеплові механізми дії. У цих процесах важливу роль відіграє вода як структурований компонент біологічних систем, що формує гідратаційні оболонки навколо молекул і іонів та визначає їхню взаємодію.

У впливі магнітного поля на живі організми умовно виділяють фізичну, фізико-хімічну та біологічну стадії. На фізичному рівні первинний ефект поля пов'язують із передачею енергії зарядженим частинкам, що перебувають у русі. Далі ці зміни трансформуються у фізико-хімічні та біохімічні процеси, які визначають реакцію біологічної системи.

Результати дії магнітного поля можуть проявлятися у вигляді:

- змін інтенсивності окисно-відновних та ферментативних реакцій;
- модифікації швидкості процесів окиснення ліпідів і функціонування електрон-транспортних ланцюгів;
- зміни проникності клітинних мембран;
- порушення або перебудови іонного балансу K^+-Na^+ в клітині через орієнтаційні ефекти водних та білкових молекул;
- зміни просторової орієнтації макромолекул РНК і ДНК, що впливає на регуляцію біопроцесів;
- поляризаційних ефектів у білкових структурах внаслідок послаблення водневих зв'язків.

З позиції поляризаційно-дифузійного механізму водопоглинання насіння встановлено, що під дією магнітного поля збільшення інтенсивності поглинання води

може пояснюватися як механічним розпушенням оболонки внаслідок поляризаційних сил, так і зміною мікроструктури середовища, що призводить до зростання коефіцієнта дифузії [6].

Таким чином, магнітне поле може розглядатися як слабкий стресовий фактор, який змінює швидкість біохімічних реакцій у насінні, активізує початкові етапи проростання, підвищує інтенсивність водопоглинання та сприяє швидшому переходу запасних речовин (зокрема крохмалю) у доступні форми цукрів [7].

Оброблене постійним магнітним полем насіння характеризується більш інтенсивним набуханням, підвищеним водоспоживанням і кращою фізіологічною активністю. У проростках посилюються процеси дихання та мобілізації поживних речовин, що в цілому сприяє прискореному формуванню повноцінних сходів і підвищенню життєздатності рослин [8].

Аналіз результатів численних експериментальних досліджень, виконаних у різних наукових установах світу, свідчить про стабільний позитивний вплив магнітного поля на біологічні об'єкти. Зокрема, встановлено, що передпосівна обробка насіння у постійному магнітному полі не призводить до негативних наслідків при практичному використанні, що підтверджує перспективність впровадження даної технології в аграрне виробництво.

Сучасні дослідження, проведені в провідних науково-дослідних центрах, спрямовані на встановлення впливу магнітного поля на посівні якості насіння, продуктивність культур, їх біометричні характеристики, а також на якість та збереження сільськогосподарської продукції. Отримані результати підтверджують покращення енергії проростання та схожості насіння, збільшення біомаси рослин і підвищення врожайності залежно від режимів магнітної обробки.

Експериментальні дані свідчать, що при обробці насіння градієнтним магнітним полем спостерігається підвищення енергії проростання і польової схожості, а також збільшення маси та розмірів проростків. В окремих дослідках відмічено підвищення врожайності сільськогосподарських культур на 3–24 %, що пояснюється покращенням фізіологічної активності рослин та оптимізацією процесів мінерального живлення.

Дослідження, проведені в різних країнах, зокрема в Болгарії, Грузії та ряді аграрних університетів, показали, що магнітна обробка насіння сприяє прискоренню появи сходів, підвищенню вмісту азотистих сполук, амінокислот і цукрів, а також покращенню морфологічних показників рослин, таких як висота, маса та розвиток кореневої системи.

Окремі експериментальні результати підтверджують, що передпосівна магнітна обробка може підвищувати польову схожість, збільшувати масу 1000 зернин, покращувати біометричні параметри рослин і забезпечувати приріст урожайності до 10–30 % залежно від культури та режимів обробки.

Додатково встановлено, що магнітне поле позитивно впливає на водопоглинання насіння, підвищує його фізіологічну активність і може зменшувати ураження рослин грибковими та бактеріальними хворобами, що підвищує загальну стійкість агроценозів.

Підвищення стійкості зерна до грибкових і бактеріальних уражень унаслідок магнітної обробки насіння в окремих випадках дозволяє зменшити норму використання протруйників до 30 %, що сприяє зниженню хімічного навантаження на агроєкосистеми та отриманню більш екологічно безпечної продукції.

Передпосівна магнітна обробка насіння зернових культур також сприяє підвищенню морозостійкості сходів у середньому на 20–40 % [22].

Дослідження показують, що вплив магнітного поля може суттєво змінювати активність ключових ферментних систем рослин, зокрема каталази, супероксиддисмутази, глутатіонредуктази, глутатіон-S-трансферази, пероксидази, аскорбатпероксидази та поліфенолоксидази. Такі експерименти проводилися на різних культурах, включаючи горох, сою, огірок, кукурудзу, боби, петрушку, редьку та пшеницю [23].

Отримані результати свідчать, що магнітне поле може активізувати утворення активних форм кисню та впливати на баланс антиоксидантної системи рослин. Постійне магнітне поле істотно модулює окисно-відновні процеси в клітинах, беручи участь у регуляції апопластних реакцій, що в кінцевому підсумку сприяє стабілізації редокс-балансу [24].

Додатково встановлено, що обробка насіння кукурудзи гібриду «Сан-Хосе» у магнітному полі супроводжується підвищенням вмісту хлорофілу в рослинах [25].

Позитивний вплив магнітної стимуляції також проявляється у поліпшенні якісних показників сільськогосподарської продукції, зокрема підвищується вміст клейковини в зерні, олійність насіння соняшнику, цукристість коренеплодів цукрового та кормового буряку, а також концентрація каротину в моркві.

Окремі дослідження підтверджують зменшення втрат продукції при зберіганні. Так, обробка картоплі магнітним полем з індукцією 68,6 мТл протягом 10 с дозволила знизити втрати з 6,9 % до 1,2 % [26].

Щодо впливу відлежки насіння після обробки, у науковій літературі відсутня єдина думка. Частина дослідників (В. Ф. Міндукшеєв, Т. М. Моїсєєва) вказує на зниження ефективності через тиждень після обробки приблизно на 15 %, тоді як інші автори (О. В. Ківа, В. Є. Ходурський) рекомендують проводити обробку не раніше ніж за 7 діб до висіву. Водночас І. Г. Сидорцов зазначає, що короткочасна відлежка (1–7 днів) не впливає на посівні якості насіння [1].

Також встановлено, що ефективність передпосівної магнітної обробки значною мірою залежить від умов вирощування. За даними Жидачеського Л. І. та Ботнарюка В. Г., при відхиленні агротехнічних факторів від оптимальних (температурного режиму, вологості та рівня родючості ґрунту) результативність магнітної стимуляції суттєво знижується.

Експериментальні дослідження показали, що при градієнті магнітного поля менше ніж 0,2 Тл/м вплив магнітної обробки на насіння є незначним і за рівнем ефекту наближається до дії природного магнітного поля Землі, що практично відповідає контрольним зразкам. Водночас при надмірно високих значеннях градієнта, близьких до 50 Тл/м, спостерігається негативний вплив магнітного поля, що проявляється у зниженні схожості насіння та зменшенні врожайності.

Як показали лабораторні та польові випробування, проведені в Азово-Чорноморській державній агроінженерній академії, найбільш ефективний режим передпосівної магнітної обробки досягається при дворазовому проходженні насіння через активну зону магнітного поля з чергуванням полярності (що відповідає

чотирикратному перемагнічуванню). При цьому оптимальний ефект спостерігається в діапазоні градієнта магнітного поля 0,2–50 Тл/м.

Сучасні дослідження підтверджують, що врожайність і біометричні характеристики сільськогосподарських культур визначаються, зокрема, величиною дози магнітного впливу, незалежно від способу формування магнітного поля [27].

Результати численних експериментів із використанням постійного магнітного поля для обробки насіння різних культур показали, що зміна індукції та тривалості експозиції формує різні рівні дози впливу, що й зумовлює відмінності у кінцевих результатах досліджень.

Загалом встановлено, що магнітне поле здатне підсилювати поглинання іонів насінням і може розглядатися як потенційна альтернатива традиційним хімічним методам передпосівної обробки [28]. Для ефективного впровадження таких технологій у виробництво необхідним є чітке визначення оптимальних режимних параметрів магнітної обробки та їх наукове обґрунтування.

1.2. Аналіз технічних засобів передпосівної обробки насіння сільськогосподарських культур в магнітному полі

Для магнітної обробки сільськогосподарської продукції використовуються установки різних типів: на основі постійних магнітів, електромагнітів, а також комбіновані системи, що поєднують обидва принципи формування магнітного поля.

Установки з постійними магнітами характеризуються конструктивною простотою, низькими витратами на експлуатацію та відсутністю необхідності електроживлення. Вони не споживають електроенергію, є екологічно безпечними та не створюють додаткового навантаження на обслуговуючий персонал.

Натомість електромагнітні установки відрізняються більш складною конструкцією та підвищеними експлуатаційними витратами, однак забезпечують можливість регулювання рівня магнітної індукції та отримання значно вищих її значень [29].

За способом обробки насіння установки поділяються на системи періодичної дії, в яких насіння перебуває в магнітному полі заданий проміжок часу, та установки безперервної дії, де матеріал постійно переміщується через робочу зону.

Установки безперервної дії характеризуються високою продуктивністю, оскільки насіння проходить через зону впливу з визначеною швидкістю. Тривалість обробки при цьому є дуже малою — від часток секунди до кількох секунд і визначається геометрією робочої зони та швидкістю руху матеріалу. Отже, доза магнітного впливу може регулюватися за рахунок зміни швидкості транспортування, розмірів робочої зони та інтенсивності магнітного поля [30].

Серед установок безперервної дії найбільш поширеними є транспортерні системи. Вони дозволяють поєднувати процес магнітної обробки з операцією завантаження насіння у транспортні засоби. Такі установки забезпечують високу продуктивність, оскільки обробка відбувається при переміщенні насіннєвого шару товщиною в кілька сантиметрів.

Окрему групу становлять установки з подачею зерна самопливом із накопичувального бункера. Вони також дозволяють суміщати технологічні операції обробки та завантаження, однак мають обмеження щодо керування швидкістю руху насіння. У цьому випадку швидкість визначається масою та фізичними властивостями насіння, що призводить до зміни дози впливу. Через короткий час обробки інтенсивність магнітного поля повинна бути відповідно підвищеною.

Питаннями магнітної обробки насіння сільськогосподарських культур та розробкою відповідного обладнання займалися такі дослідники, як G. Bucur [31], S. Pietruszewski [32], A. de Souza Torres [33], Kato R. [34], U. I. Pittman [35] та інші.

Для лабораторних досліджень зазвичай використовуються установки, що складаються із соленоїда, всередині якого розміщується ємність із досліджуваним насінням (рис. 1.1).

Окремі конструкції пристроїв для магнітної обробки насіння виконуються у вигляді систем із шести котушок, розташованих на залізногомагнітопроводі з повітряним зазором. У цьому зазорі (приблизно 2 см) розміщується насіннєвий матеріал. Електричний струм у котушках формує магнітне поле, силові лінії якого

проходять через магнітопровід і робочу зону. Діапазон магнітної індукції в зазорі може змінюватися в межах 0–230 мТ, залежно від величини струму в обмотках [36].

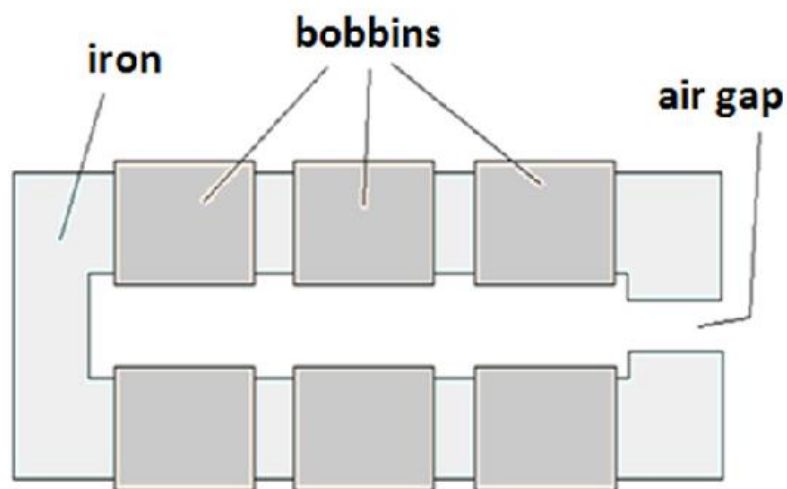


Рис. 1.1. Установка для обробки насіння в магнітному полі з електромагнітами

Відомі установки для магнітної обробки насіння, що містять трубчастий робочий канал із соленоїдом, у якому при протіканні електричного струму формується постійне магнітне поле. Робоча труба, як правило, розташовується вертикально, а у верхній частині обладнується завантажувальною воронкою, через яку насіння подається в зону обробки. У процесі переміщення вздовж труби насіння піддається впливу магнітного поля [36].

Більш досконала організація процесу транспортування насіння реалізована в іншій конструкції установки для передпосівної магнітної обробки (рис. 1.2), де забезпечується рівномірніший рух матеріалу та стабільніші умови його обробки.

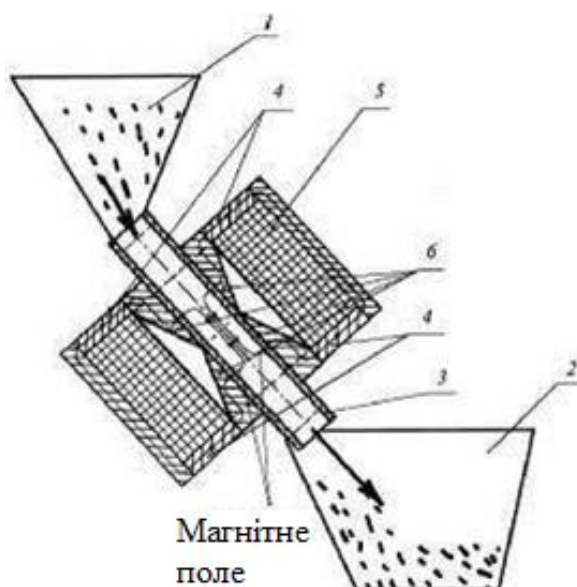


Рис. 1.2. Установка для передпосівної обробки насіння в магнітному полі:

1 – завантажувальний бункер; 2 – приймальний бункер опрацьованого матеріалу; 3 – діамагнітна труба; 4 – циліндричний корпус з феромагнітного матеріалу; 5 – магнітопровід з намагнічуючою котушкою; 6 – центруюча втулка із немагнітного матеріалу

Установка містить камеру обробки, виконану у вигляді похило розташованої діамагнітної труби, яка знаходиться в зоні дії індуктора. Кут нахилу робочого каналу визначає тривалість перебування насіння в активній зоні магнітного поля, а відповідно — і дозу впливу.

Основним недоліком даного типу пристроїв є нестабільність швидкості переміщення насіннєвого матеріалу, що призводить до нерівномірності часу обробки. Додатково спостерігається неоднорідність розподілу магнітної індукції в робочій камері, яка залежить від положення насіння в поперечному перерізі потоку.

Промислово виготовляється установка для передпосівної стимулюючої обробки насіння «ЦИКЛОН 7-3у», яка характеризується масою 8,5 кг та споживаною потужністю до 30 Вт. Її продуктивність становить 10 т/год, а максимальна — до 20 т/год. Габаритні параметри установки: висота 650 мм, діаметр приймальної воронки 300 мм, висота циліндричного корпусу з електромагнітною системою 500 мм, діаметр корпусу 180 мм.



Рис. 1.3. Загальний вигляд установка для передпосівної стимулюючої обробки насіння «ЦИКЛОН 7-3у»

Розроблена установка для передпосівної обробки насіння магнітним полем (рис. 1.4) містить завантажувальний бункер 1 і приймальний бункер 2, які з'єднані між собою діамагнітною трубою 3. У конструкцію також входить магнітопровід 4 із намагнічувальною котушкою 5.

Феромагнітний елемент виконаний у вигляді двох однакових втулок, з'єднаних між собою та спрямованих одна до одної конусними частинами меншого діаметра, які формують конусні наконечники 6.

Усередині діамагнітної труби 3 розміщено активатор 7, виконаний у вигляді діамагнітного стрижня з розташованими на ньому по гвинтовій лінії пластинами 8. Ці пластини мають фрикційну поверхню, на якій закріплені перпендикулярно розміщені стрижні 9, встановлені в шаховому порядку з кроком, рівним максимальному розміру насіння за довжиною [37].

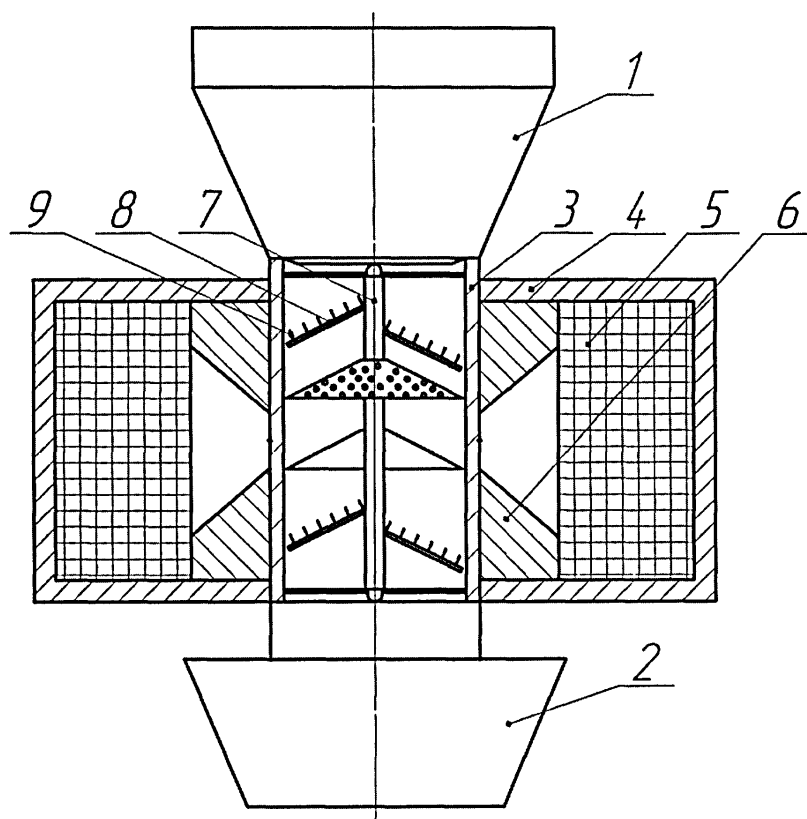


Рис. 1.4. Установка для передпосівної обробки насіння

Установка для передпосівної обробки насіння магнітним полем працює таким чином. Насіннєвий матеріал самопливом подається із завантажувального бункера 1 через діамагнітну трубу 3 до приймального бункера 2. У процесі руху насіння потрапляє на активатор 7, де воно перекочується без ковзання по похило розташованих пластинах 8 та, взаємодіючи зі стрижнями 9, здійснює обертання навколо своєї осі. Це забезпечує багаторазову зміну орієнтації насіння в магнітному полі, що сприяє рівномірнішому впливу поля з різних боків і підвищує ефективність обробки. Наявність активатора формує турбулентний характер руху насіннєвого потоку, що додатково інтенсифікує процес магнітного впливу.

Разом із тим, установкам для передпосівної обробки насіння з електромагнітами притаманна істотна неоднорідність магнітного поля, що ускладнює забезпечення однакової індукції для всіх частинок насіння. Це призводить до варіативності ступеня впливу та зниження стабільності результатів обробки.

Обробка насіння в таких системах здійснюється всередині соленоїда відносно малого діаметра. При збільшенні його розмірів спостерігається зменшення магнітної індукції в робочій зоні, що негативно впливає на ефективність технологічного процесу.

Додатковим недоліком є необхідність використання спеціалізованого джерела живлення постійного струму для живлення соленоїда. Це суттєво підвищує вартість обладнання, збільшує енергоспоживання та експлуатаційні витрати, що робить установки з електромагнітами економічно менш доцільними порівняно з системами на постійних магнітах.

У зв'язку з цим значного поширення набули установки для магнітної обробки сільськогосподарської продукції з використанням постійних магнітів.

Найпростіші конструкції таких пристроїв містять два постійні магніти, що формують знакозмінне магнітне поле [80].

Окремі американські компанії випускають промислові установки для магнітної обробки насіння сільськогосподарських культур. За їхніми даними, оброблене насіння зберігає набуті властивості протягом тривалого часу; навіть через 11 років після обробки різниця між контрольними та обробленими зразками залишається порівнянною з початковими значеннями. Рекомендована індукція магнітного поля становить близько 30 Гс.

Розроблена установка для передпосівної магнітної обробки насіння з постійними магнітами (рис. 1.5) [37] складається з корпусу 1 у вигляді труби із завантажувальним вікном 2. Усередині корпусу розміщено пристрій формування магнітного поля, виконаний у вигляді дискових магнітів 3, встановлених на спільній осі 4 з бічними щічками 5, між якими утворюється робочий зазор 6. Дискові магніти розділені дугоподібними прокладками 7 і 8 з немагнітного матеріалу.

Принцип роботи установки полягає в тому, що насіння через завантажувальне вікно потрапляє в проміжки між дисковими магнітами 3, де перебуває в зоні однорідного магнітного поля, що забезпечує однакову інтенсивність впливу на кожен насінину.

Регулювання магнітної індукції здійснюється шляхом зміни відстані між дисковими магнітами. Після завершення обробки установка повертається на 180° , і насіння вивантажується через завантажувальне вікно 2.

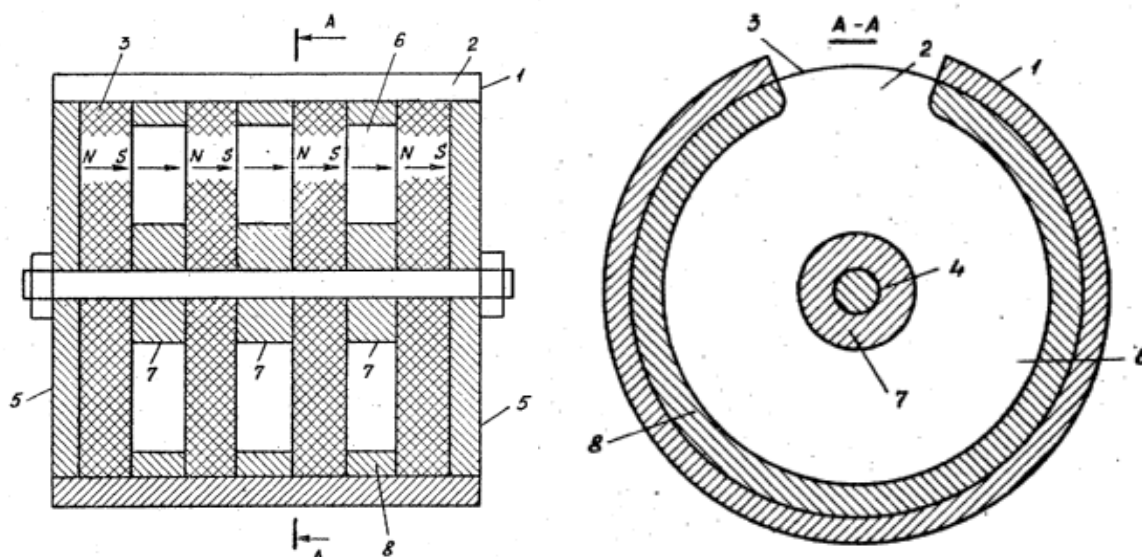


Рис. 1.5. Пристрій для передпосівної обробки насіння з постійними дисковими магнітами

Розроблене обладнання для передпосівної обробки насіння забезпечує обробку насіннєвого матеріалу в процесі його завантаження у транспортні засоби. Конструктивно система встановлюється над стрічкою вивантажувального транспортера ТЗК-30 і містить шість пар магнітних модулів, розміщених на відстані 110 мм один від одного та відносно стрічки транспортера. Робоча швидкість переміщення бульб (насіння) в зоні магнітного впливу становить 1,0–1,3 м/с при напруженості магнітного поля 20 Е.

Магнітний модуль виконаний у вигляді двох касет, кожна з яких містить по два магніти. Касети з магнітними елементами закріплюються на кронштейні за допомогою коромисла та фіксувального механізму, що забезпечує стабільність їх положення під час роботи.

На рис. 1.6 наведено загальний вигляд обладнання для магнітної обробки розсади сільськогосподарських культур або насіння.

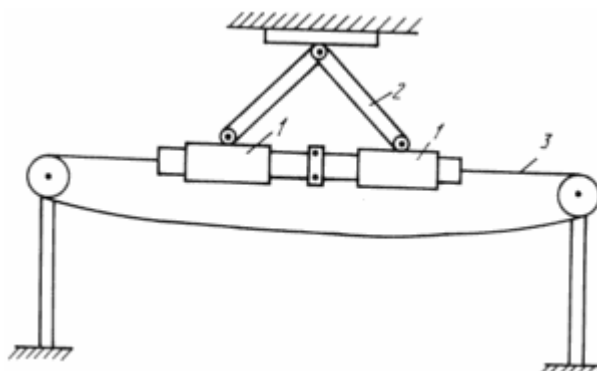


Рис. 1.6. Установка електромагнітної обробки розсади сільськогосподарських культур або їх насіння

Магнітні модулі 1 виготовлені з ферито-барієвого сплаву та мають полюси з плоскою робочою поверхнею. За допомогою кронштейна 2 модулі 1 встановлюються з чергуванням полярності магнітних полюсів, що забезпечує формування знакозмінного магнітного поля. Магнітне поле при цьому діє у поперечному напрямку відносно стрічки транспортера 3, якою подається розсадний матеріал або насіння на етапі висаджування.

Кількість встановлених магнітних модулів 1 на кронштейні 2 визначається необхідною кратністю магнітної обробки для конкретного виду насіннєвого матеріалу. Оптимальний режим обробки спостерігається при магнітній індукції в робочій зоні в межах 30–120 мТл.

Для передпосівної обробки бульб картоплі розроблено установку, що містить шість пар магнітних модулів, розташованих над стрічкою завантажувального транспортера картоплі ТЗК-30. Відстань між сусідніми модулями становить 110 мм, а відстань від модуля до стрічки транспортера — 150 мм. Магнітні модулі встановлюються з чергуванням полярності.

Під час проходження через магнітне поле насіннєвий матеріал зазнає стимулюючого впливу, що проявляється у підвищенні проникності клітинних мембран, перерозподілі іонів у клітинах, а також у виникненні електричних ефектів, зумовлених рухом рідинних і колоїдних структур у магнітному полі [38].

Для передпосівної обробки та протруювання насіння в знакозмінному магнітному полі в Азово-Чорноморській державній агроінженерній академії (Росія) розроблено модулі на основі ферито-барієвих постійних магнітів типу М-3, а також

конструкції з U-подібними та плоскими твердосплавними магнітами (М-4 і М-5). Вони можуть монтуватися як над стрічковими транспортерами, так і на протруювальних установках.

І. Г. Сидорцовим також запропоновано установку на циліндричних постійних магнітах, яка встановлюється на виході шнека протруювача ПС-10А (рис. 1.7). Найбільш ефективний режим обробки при цьому досягається за напруженості магнітного поля 3–5 кА/м та тривалості впливу 1–3 с.



Рис. 1.7. Установка для передпосівної обробки насіння у магнітному полі постійних магнітів: 1 – блок касет постійних магнітів; 2 – протруювач ПС – 10А

Передпосадкова обробка цибулі-ріпки в знакозмінному магнітному полі сприяє виведенню цибулин зі стану спокою та підвищенню накопичення біомаси при конвеєрній вигонці зеленої продукції як в умовах захищеного, так і відкритого ґрунту протягом усього року [84].

Пристрій для обробки посадкового матеріалу цибулі перед висаджуванням складається з шести модулів. Кожен модуль (рис. 1.8) включає касету з магнітами 1, коромисло 2, кронштейн 3, стопорний палець 4 та кріпильні болти 5.

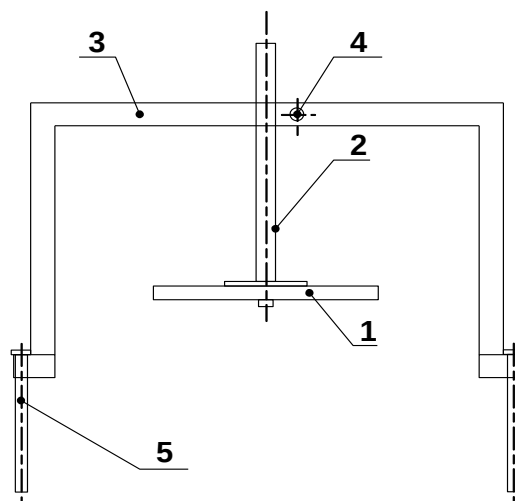


Рис. 1.8. Модуль установки для обробки посівного матеріалу. Вигляд збоку

Модулі монтуються на завантажувальний транспортер ТЗК-30 (рис. 1.9) із дотримання відповідного чергування полярності магнітів. Відстань від них до стрічки транспортера повинна складати близько 100 мм.

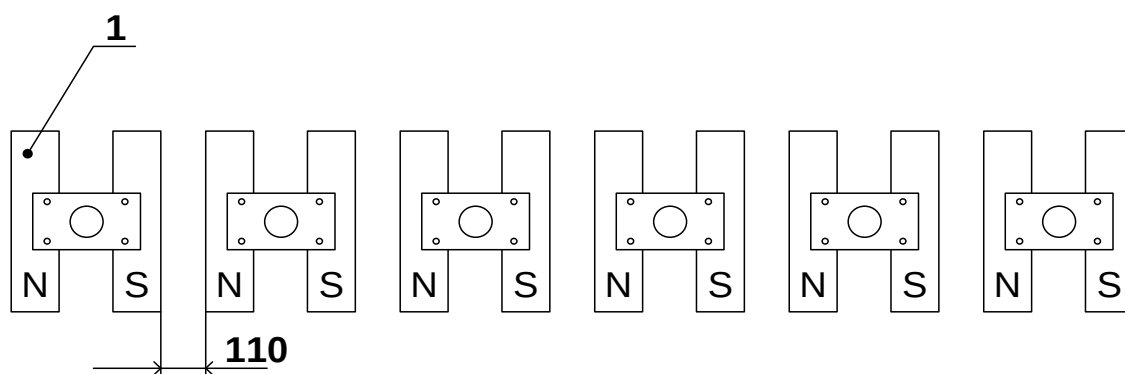


Рис. 1.9. Розміщення модулів для обробки посівного матеріалу

Сухі здорові цибулини 1 (рис. 1.10) діаметром 15–50 мм із накопичувача 2 подаються на стрічковий транспортер 3, який переміщує їх зі швидкістю 1,0–1,3 м/с через зону дії знакозмінного магнітного поля.

Продуктивність установки становить до 25 т/рік. Обробка цибулі в магнітному полі забезпечує прискорення отримання врожаю вигонки на 3–5 днів порівняно з традиційною технологією, а також підвищує вихід стандартної зеленої продукції з 3,1 до 4,2 кг/м².

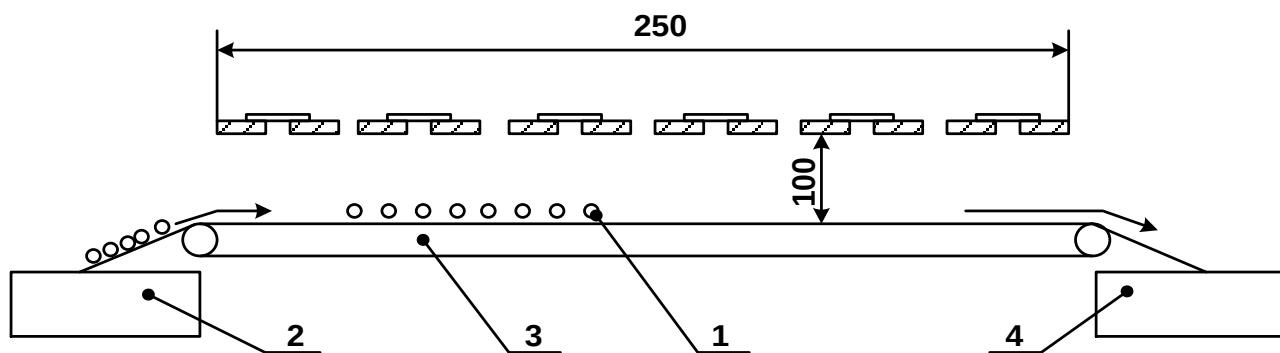


Рис. 1.19. Пристрій для обробки посівного матеріалу в градієнтному магнітному полі

Установка для обробки насіння соняшника складається з бункера, дозувальної засувки та магнітного модуля. Магнітний модуль виконаний у вигляді циліндра, всередині якого за допомогою болтів і діелектричних вставок закріплені циліндричні магніти. Завдяки наявності технологічних отворів у корпусі конструкції передбачена можливість зміни кількості магнітів та регулювання відстані між ними.

За результатами експериментальних досліджень встановлено оптимальні параметри роботи установки для обробки насіння соняшника у знакозмінному магнітному полі: градієнт магнітного поля становить $0,88 \text{ мТл/мм}$, використовується два магніти з відстанню між ними 8 см , а рух насіння здійснюється від північного до південного полюса.

Застосування розробленої установки забезпечило підвищення врожайності соняшнику сортів «Козачий», «Майстер» та гібриду «Сигнал» у межах $1,9\text{--}2,6 \text{ ц/га}$ залежно від сорту.

Загалом установки для магнітної обробки сільськогосподарської продукції характеризуються простотою конструкції, енергоефективністю та не потребують високої кваліфікації обслуговуючого персоналу. На відміну від хімічних, радіаційних або складних електрофізичних методів, магнітна обробка на основі постійних магнітів є безпечною, технологічно простою та екологічно прийнятною.

Проведений аналіз свідчить, що застосування установок для передпосівної обробки насіння магнітним полем є доцільним, оскільки використовувані режими забезпечують ефективну стимуляцію насіннєвого матеріалу без перевищення граничних доз впливу. Процес легко піддається автоматизації, а параметри обробки

можуть точно регулюватися та узгоджуватися з агротехнологічними операціями, що в середньому забезпечує підвищення врожайності на 10–15 %.

Таким чином, аналіз сучасних установок для електромагнітної обробки сільськогосподарської продукції показав, що найбільш ефективною є передпосівна обробка насіння в транспортерних системах у знакозмінному магнітному полі з використанням постійних магнітів.

РОЗДІЛ 2

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА НАСІННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР

2.1 Лабораторна установка для проведення експериментальних досліджень впливу магнітного поля на насіння зернових культур

У результаті проведених теоретичних досліджень встановлено, що основними чинниками, які визначають ефективність обробки насіння сільськогосподарських культур у магнітному полі, є магнітна індукція та її градієнт (полюсна періодичність), кількість перемагнічувань, а також швидкість переміщення насіннєвого матеріалу в робочій зоні.

Для проведення експериментальних досліджень впливу магнітного поля на насіння сільськогосподарських культур розроблено лабораторну установку, яка наведена на рис. 2.1.

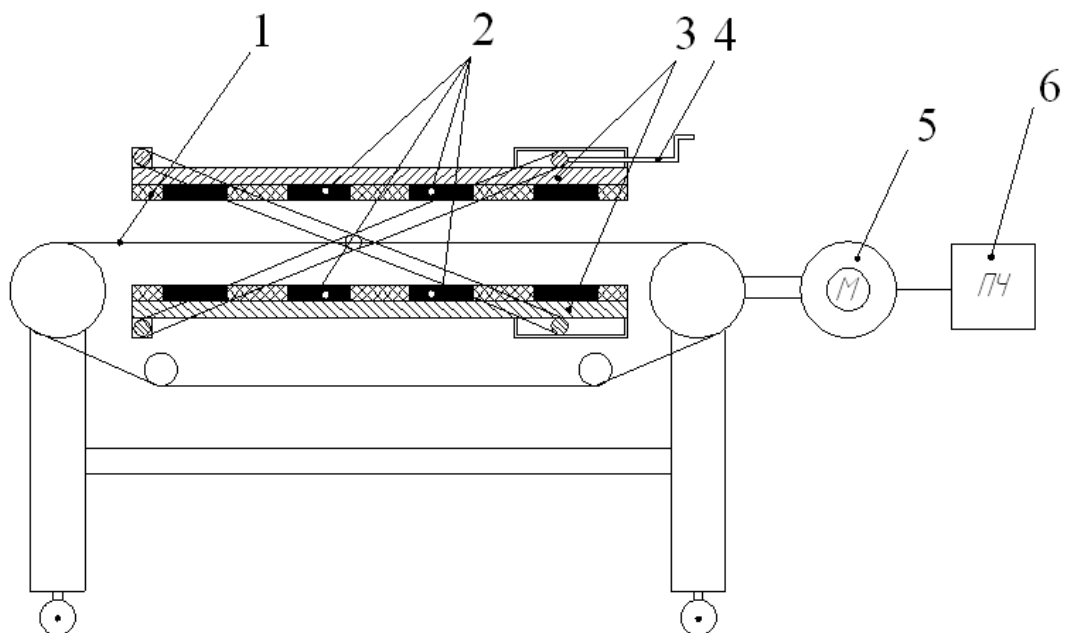


Рис. 2.1. Установка для магнітної обробки насіння зернових культур:
1 – транспортер; 2 – постійні магніти; 3 – сталевая плита; 4 – рукоятка; 5 -
електродвигун; 6 – перетворювач частоти

Установка містить чотири пари магнітів 2, виготовлених з інтерметалічного композиту NdFeB, які розташовані паралельно над та під стрічкою транспортера зі змінною полярністю. Магніти закріплені на плиті 3, виконаній зі сталевих матеріалів.

З фронтальної сторони магнітні елементи розміщені між двома стрічками з нержавіючої сталі, що забезпечує можливість їх переміщення та регулювання відстані між магнітами. Проміжки між магнітними елементами заповнюються дерев'яними брусками різної ширини, що дозволяє встановлювати необхідну полюсну періодичність (поділку).

Регулювання величини магнітної індукції здійснюється шляхом зміни відстані між магнітопроводами за допомогою регулятора магнітної індукції 4.

Для забезпечення монтажу магнітної плити під стрічкою транспортера конструкцією передбачено використання чотирьох опорних роликів.

Привід транспортера 1 здійснюється від трифазного асинхронного електродвигуна потужністю 0,25 кВт через знижувальний редуктор. Живлення електродвигуна здійснюється від перетворювача частоти 6, який забезпечує регулювання швидкості руху насіннєвого матеріалу в магнітному полі.

2.2. Методика експериментальних досліджень впливу магнітного поля на насіння зернових культур

Експериментальні дослідження впливу магнітного поля на насіння зернових культур виконували на розробленій лабораторній установці (рис. 2.1). Насіннєвий матеріал переміщувався транспортером через зону дії магнітного поля, яке створювалося чотирма парами постійних магнітів, встановлених попарно над і під стрічкою транспортера зі змінною полярністю.

Регулювання магнітної індукції здійснювали шляхом зміни відстані між магнітними елементами в діапазоні 0–0,5 Тл, при цьому її контроль проводили за допомогою тесламетра 43205/1. Полюсну періодичність (поділку) змінювали за рахунок варіювання відстані між магнітами в межах 0,14–0,32 м.

Швидкість переміщення насіння через робочу зону магнітного поля регулювали в межах 0,4–0,8 м/с шляхом зміни кутової швидкості приводного двигуна транспортера за допомогою частотного перетворювача.

Дослідження впливу режимних параметрів магнітної обробки на посівні якості насіння здійснювали з використанням методів планування експерименту [93]. У роботі застосовано ортогональний центральном-композиційний план, а також план Бокса–Бенкена.

Як фактори дослідження розглядали магнітну індукцію, швидкість руху насіння, а в окремих серіях дослідів — також полюсну поділку. Вихідними параметрами приймали енергію проростання, схожість насіння та біопотенціал.

За результатами однофакторних експериментів визначено рівні варіювання факторів: для магнітної індукції — 0; 0,065 і 0,130 Тл (нижній, основний і верхній рівні відповідно), для швидкості руху насіння — 0,4; 0,6 і 0,8 м/с, для полюсної поділки — 0,14; 0,23 і 0,32 м.

Оброблене в магнітному полі насіння піддавали пророщуванню з подальшим визначенням енергії проростання та схожості [94, 95].

Енергію проростання насіння в кожній аналітичній пробі у відсотках визначали за формулою:

$$E = \frac{500 - n}{500} \cdot 100 \%, \quad (2.1)$$

де n – кількість насінин, які не проросли за 72 год, шт.; 500 – кількість насінин в аналітичній пробі.

Схожість (здатність проростання) насіння кожної аналітичної проби у відсотках розраховували за формулою:

$$G = \frac{500 - n_1}{500} \cdot 100 \%, \quad (2.2)$$

де n_1 - кількість насінин, які не проросла за 120 год, шт.

Обробка результатів проведених багатофакторних експериментів здійснювалася за відомою методикою.

2.3. Методика визначення ефекту магнітної обробки насіння

Загальним недоліком існуючих методів електромагнітної стимуляції є відсутність інструментального контролю дози обробки. Її оптимальні значення, як правило, встановлюються опосередковано — за кінцевими результатами, які значною мірою залежать від агрокліматичних умов, родючості ґрунтів, технології вирощування та інших зовнішніх факторів.

У зв'язку з цим важливим завданням при визначенні оптимальних режимів магнітної обробки є розробка науково обґрунтованих методів індикації її ефекту, що потребує окремого дослідження та методичного забезпечення.

Проведені дослідження показали, що для оцінювання ефективності магнітної обробки найбільш доцільним є використання потенціометричних методів вимірювання. Вони дозволяють проводити вимірювання безпосередньо в суспензіях без спеціальної підготовки проби та без впливу на неї зовнішніх електричних або магнітних полів, які могли б змінити властивості досліджуваного середовища.

Оскільки більшість біохімічних процесів у насінні сільськогосподарських культур мають окисно-відновний характер, ефективність магнітної обробки доцільно оцінювати за зміною біопотенціалу рослинного матеріалу. Біопотенціал вимірюють за допомогою рН-метра-мілівольтметра або іоніметра з електродною системою, що включає платиновий робочий і хлорсрібний допоміжний електроди.

Для вимірювання біопотенціалу розроблено спеціальний вимірювальний електрод, виконаний у вигляді платинової пластини із загостреним робочим кінцем (ножеподібної форми). Платиновий електрод вводиться безпосередньо в тканину проростків. Як допоміжний електрод використовується стандартний хлорсрібний електрод.

Оцінювання ефекту магнітної обробки здійснюють шляхом визначення різниці біопотенціалів між проростками необробленого та обробленого насіння з подальшим порівнянням отриманого значення з розширеною

невизначеністю вимірювання. Якщо різниця перевищує межу невизначеності, це свідчить про статистично значущий вплив магнітної обробки на фізіолого-біохімічні процеси в насінні.

При розробці методики оцінювання ефекту магнітної обробки необхідно враховувати невизначеність вимірювань. Однак у чинних нормативних матеріалах наведено лише загальні підходи до її визначення, що зумовлює необхідність розроблення окремої методики оцінки невизначеності вимірювання біопотенціалу при магнітній обробці картоплі.

У дослідженнях невизначеності вимірювань біопотенціалу проростків необробленого та магнітно обробленого насіння використовували іонімір И-160М. Вимірювання виконували у п'ятикратній повторності. За отриманими результатами визначали середнє значення вимірюваної величини:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k, \quad (2.3)$$

де x_k – спостереження вимірюваної величини, n – кількість вимірювань.

Дослідження невизначеності вимірювань біопотенціалу насіння виконували відповідно до методичних рекомендацій щодо оцінювання невизначеності вимірювань [96].

Для цього визначали середньоквадратичне відхилення вимірюваної величини та її середнє значення за стандартною статистичною процедурою, яке розраховували за формулою:

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}. \quad (2.4)$$

Стандартні невизначеності типу А визначали за експериментальним стандартним відхиленням середнього значення [96]:

$$u(\bar{x}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}. \quad (2.5)$$

Стандартну невизначеність типу В визначають на основі даних попередніх вимірювань, накопиченого досвіду та загальних відомостей про властивості досліджуваних матеріалів і засобів вимірювальної техніки. Крім

того, враховують інформацію зі специфікацій виробника, свідоцтв метрологічної атестації, результатів повірки та калібрування, а також довідкові дані щодо характеристик вимірюваної величини.

У випадку, коли розподіл значень вимірюваної величини є рівномірним (прямокутним), стандартну невизначеність типу В визначають за формулою:

$$u(x) = \frac{a}{\sqrt{3}}, \quad (2.6)$$

де a – границі максимально допустимих похибок вимірювального приладу.

Сумарну стандартну невизначеність розраховували за формулою [96]:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)} = \sqrt{c_i^2 u(x_i)^2}, \quad (2.7)$$

де $c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$ – коефіцієнт чутливості,

а розширену невизначеність – за формулою:

$$U = k \cdot u_c(y), \quad (2.8)$$

де $k=2$ – коефіцієнт охоплення для рівня довіри 95 % [96].

Для визначення сумарної стандартної невизначеності необхідно мати математичну модель вимірювання біопотенціалу. Рівняння моделі вимірювання біопотенціалу має вигляд:

$$БП = 820 - E_0 - 2,3 \frac{RT}{zF} \lg \frac{a_{ox}}{a_{red}}, \quad (2.9)$$

де E_0 – стандартний потенціал; a_{ox} – концентрація окисленої форми іонів; a_{red} – концентрація відновленої форми іонів.

Тоді сумарна стандартна невизначеність вимірювання біопотенціалу за рівнянням (2.9) розраховується за формулою:

$$u^2(БП) = u^2(E_0) + \left(\frac{2,3R}{zF} \lg \frac{a_{ox}}{a_{red}} \right)^2 u^2(T), \quad (2.10)$$

або

$$u^2(БП) = u^2(E_0) + \left(\frac{\bar{E} - E_0}{\bar{T}} \right)^2 u^2(T). \quad (2.11)$$

Таблиця 2.1

И-160М

[illegible]

Таким чином, ефект магнітної обробки насіння вважається підтвердженим у випадку, коли різниця між значеннями біопотенціалу до обробки та після впливу магнітного поля перевищує 2 мВ.

2.4. Експериментальні дослідження зміни біопотенціалу насіння зернових культур при передпосівній обробці в магнітному полі

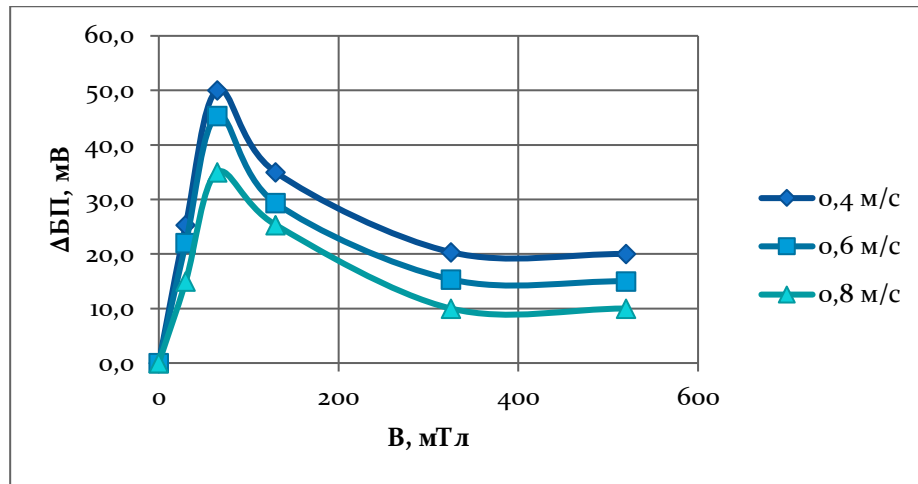
Під час обробки насіння в магнітному полі спостерігається зміна швидкості перебігу хімічних і біохімічних реакцій у рослинних клітинах, які переважно мають окисно-відновний характер. Це, у свою чергу, призводить до зміни окисно-відновного потенціалу (біопотенціалу) насіннєвого матеріалу.

Експериментальні дослідження впливу магнітного поля на біопотенціал насіння проводили з використанням насіння гороху сорту «Адагумський», квасолі сорту «Грибовський», жита сорту «Харківський 98», вівса сорту «Деснянський», ячменю сорту «Солнцедар», огірка сорту «Сквирський» та соняшника сорту «Люкс».

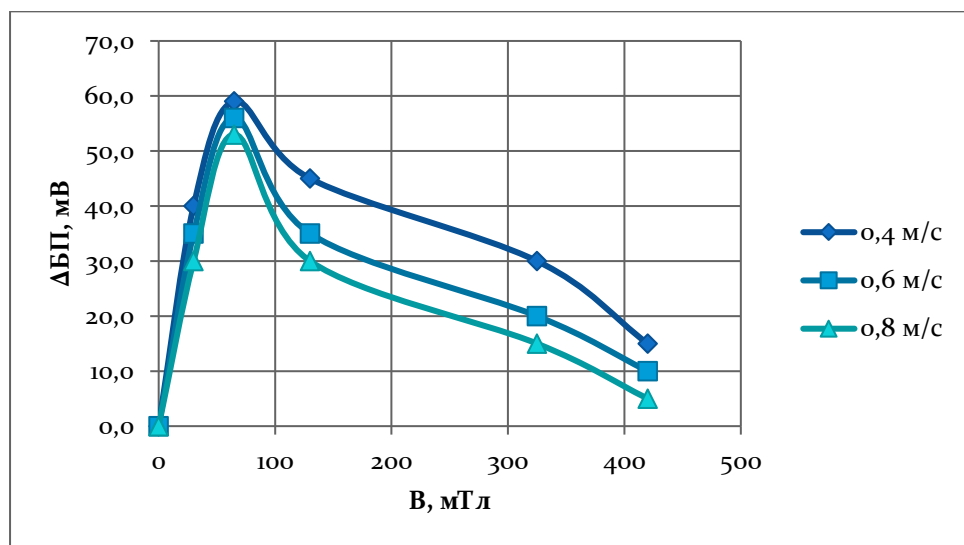
Насіннєвий матеріал переміщували транспортером через зону дії магнітного поля, яке створювалося чотирма парами постійних магнітів. Магнітну індукцію змінювали в межах 0–0,5 Тл, а швидкість руху стрічки транспортера — у діапазоні 0–0,8 м/с.

Після магнітної обробки насіння пророщували, після чого визначали біопотенціал проростків як для контрольних, так і для оброблених зразків.

Залежність біопотенціалу проростків гороху від магнітної індукції та швидкості руху насіння при передпосівній обробці наведена на рис. 3.2. Встановлено, що при збільшенні магнітної індукції від 0 до 0,065 Тл біопотенціал зростає, однак при подальшому підвищенні індукції спостерігається його зниження. При значеннях магнітної індукції понад 0,13 Тл біопотенціал стабілізується, залишаючись вищим за контрольні значення для необробленого насіння.



а



б

Рис. 2.2. Залежність зміни біопотенціалу насіння від магнітної індукції та швидкості руху в магнітному полі:

а – жито; б – ячмінь

Дослідження впливу режимних параметрів магнітної обробки на зміну біопотенціалу насіння виконувалися із застосуванням методів планування багатofакторного експерименту, що дозволяє встановити статистично значущі залежності між вхідними факторами та вихідною характеристикою процесу.

Математична модель у вигляді рівняння регресії, що описує залежність біопотенціалу насіння від режимних параметрів обробки у фізичних величинах, записується у вигляді:

для жита

$$\Delta БП = 34,825 + 1124B - 33,426v - 18.519Bv - 8532B^2. \quad (2.12)$$

для вівса

$$\Delta БП = 34,825 + 1124B - 33,426v - 18.519Bv - 8532B^2. \quad (2.13)$$

для ячменю

$$\Delta БП = 34,825 + 1124B - 33,426v - 18.519Bv - 8532B^2. \quad (2.14)$$

Проведені експериментальні дослідження зміни біопотенціалу насіння при його обробці в магнітному полі підтвердили адекватність отриманої аналітичної моделі. Встановлено, що зміна біопотенціалу під час передпосівної магнітної обробки визначається квадратичною залежністю від магнітної індукції та залежить від швидкості переміщення насіння в робочій зоні магнітного поля.

За результатами експериментів визначено, що максимальна зміна біопотенціалу спостерігається при магнітній індукції близько 0,065 Тл. Швидкість руху насіння в діапазоні 0,4–0,8 м/с також впливає на результати обробки, однак її внесок є менш значущим порівняно з магнітною індукцією.

Найбільш ефективним режимом обробки виявлено швидкість 0,4 м/с, за якої досягаються максимальні значення біопотенціалу.

У зазначеному режимі біопотенціал насіння збільшувався: для гороху — на 33 мВ, квасолі — на 38 мВ, жита — на 59 мВ, вівса — на 30 мВ, ячменю — на 50 мВ, огірка — на 58 мВ та соняшника — на 34 мВ. Отримані прирости суттєво перевищують розширену невизначеність вимірювання біопотенціалу насіння (2 мВ), що підтверджує статистичну значущість ефекту магнітної обробки.

2.5. Експериментальні дослідження зміни водопоглинання насіння зернових культур при передпосівній обробці в магнітному полі

Під час обробки насіння в магнітному полі спостерігається підвищення швидкості дифузійних процесів молекул води через клітинні мембрани, що призводить до збільшення інтенсивності водопоглинання насіння.

Експериментальні дослідження водопоглинання насіння при магнітній обробці виконувалися на насінні пшениці сорту «Наталка» та ячменю сорту «Солнцедар».

Насіннєвий матеріал переміщувався транспортером через зону дії магнітного поля, яке формувалося чотирма парами постійних магнітів, розташованих зі змінною полярністю. Магнітну індукцію регулювали в діапазоні 0–0,5 Тл, а швидкість проходження насіння через робочу зону змінювали в межах 0–0,8 м/с.

Контрольні та оброблені зразки насіння зважували до замочування та після витримки у дистильованій воді протягом 30 хвилин. Питоме водопоглинання визначали за формулою:

$$Y = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100\%, \quad (2.15)$$

де m_2 – маса насіння (контрольного та обробленого) після замочування; m_1 – маса насіння до замочування.

Експериментально встановлено, що при збільшенні магнітної індукції в діапазоні 0–0,065 Тл спостерігається зростання водопоглинання насіння, тоді як подальше підвищення індукції призводить до поступового зниження цього показника (рис. 2.3). При значеннях магнітної індукції понад 0,130 Тл зміна водопоглинання стає незначною і стабілізується на рівні: для пшениці — в середньому 11,5 % (у контролі — 8,3 %), для ячменю — 17 % (у контролі — 9,8 %).

Дослідження впливу режимних параметрів магнітної обробки на водопоглинання насіння виконувалися з використанням методів планування

експерименту. На основі серії однофакторних дослідів визначено рівні варіювання факторів: для магнітної індукції — 0; 0,065 і 0,130 Тл, для швидкості руху насіння — 0,4; 0,6 і 0,8 м/

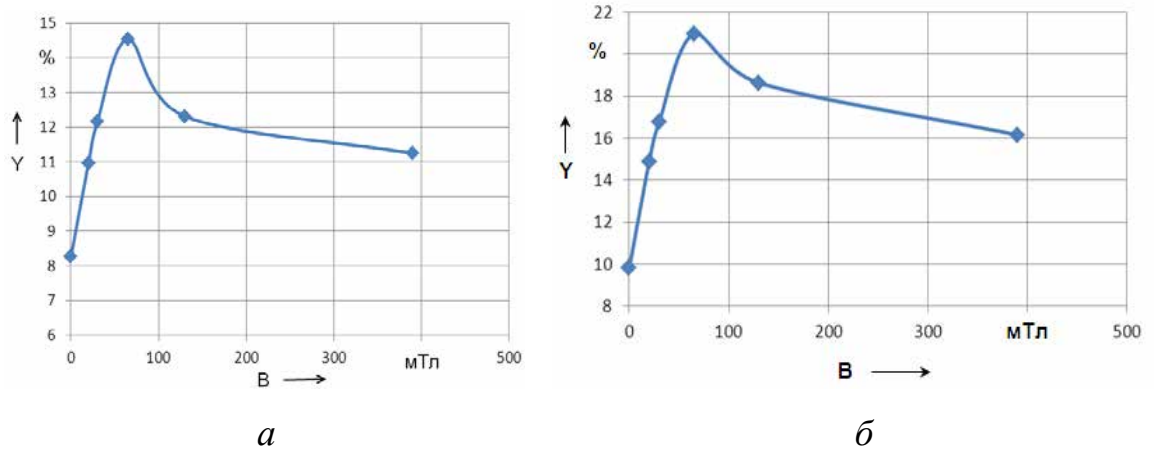


Рис. 2.3. Залежності питомого водопоглинання насіння пшениці (а) та ячменю (б) від магнітної індукції

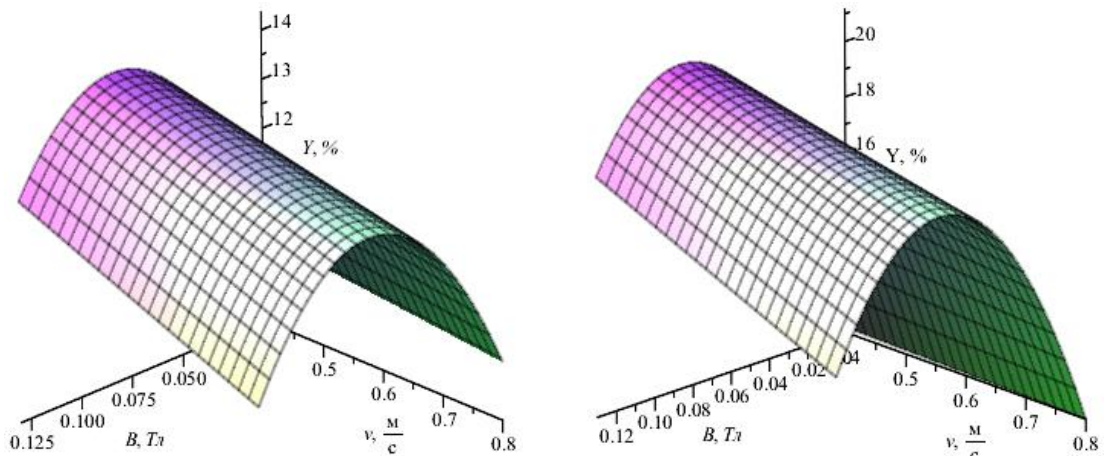
За результатами проведеного багатфакторного експерименту отримано рівняння регресії, які в фізичних величинах мають вигляд (рис. 3.4):

для насіння пшениці

$$Y = 8,894 + 154,53 B - 1,028 v - 33,333 Bv - 844,181 B^2; \quad (2.16)$$

для насіння ячменю

$$Y = 9,836 + 298,33 B - 0,486 v - 75 Bv - 1562 B^2. \quad (2.17)$$



*a**б*

Рис. 2.4. Зміна питомого водопоглинання при обробці насіння пшениці (*a*) і ячменю (*б*) в магнітному полі

Максимальне значення водопоглинання насіння спостерігається при магнітній індукції близько 0,065 Тл. Встановлено також, що ефект магнітної обробки залежить від швидкості руху насіння, однак у діапазоні 0,4–0,8 м/с цей фактор має менш суттєвий вплив порівняно з величиною магнітної індукції.

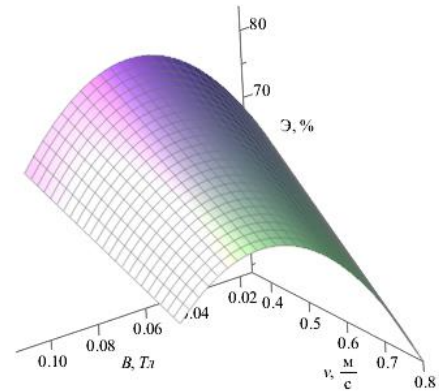
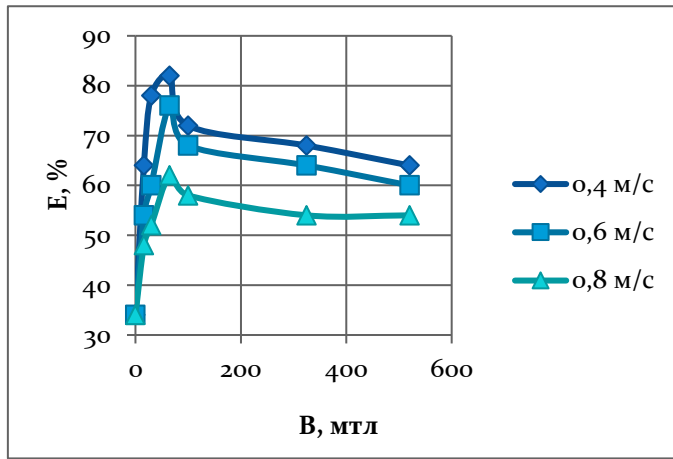
За результатами експериментальних досліджень визначено, що найбільш ефективний режим досягається при магнітній індукції 0,065 Тл, чотирикратному перемагнічуванні та швидкості руху насіння 0,4 м/с. У цьому випадку відносне водопоглинання збільшується: для насіння пшениці — на 6 %, для ячменю — на 11 %.

2.5. Експериментальні дослідження зміни енергії проростання і схожості насіння зернових культур при передпосівній обробці в магнітному полі

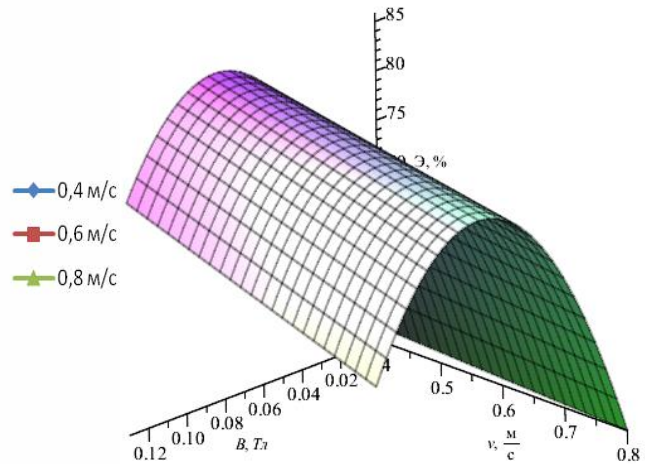
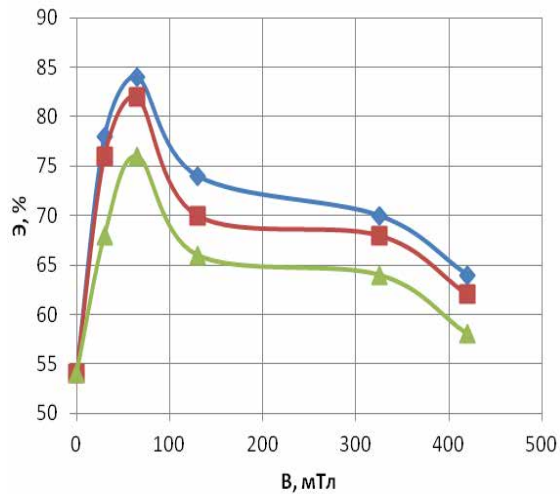
Підвищення швидкості перебігу хімічних і біохімічних реакцій у насінні під впливом магнітного поля, збільшення розчинності солей і кислот, інтенсифікація дифузійних процесів кисню та води через клітинні мембрани, а також прискорення транспорту іонів сприяють підвищенню енергії проростання та схожості насіння сільськогосподарських культур.

Експериментальні дослідження впливу магнітного поля на енергію проростання та схожість насіння зернових культур проводили із використанням насіння пшениці сорту «Наталка», жита сорту «Харківський 98», ячменю сорту «Солнцедар», кукурудзи сорту «Зоря 123» та вівса сорту «Деснянський».

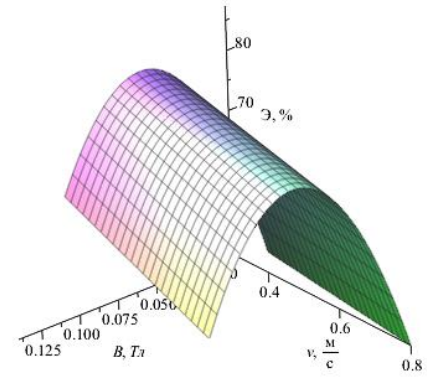
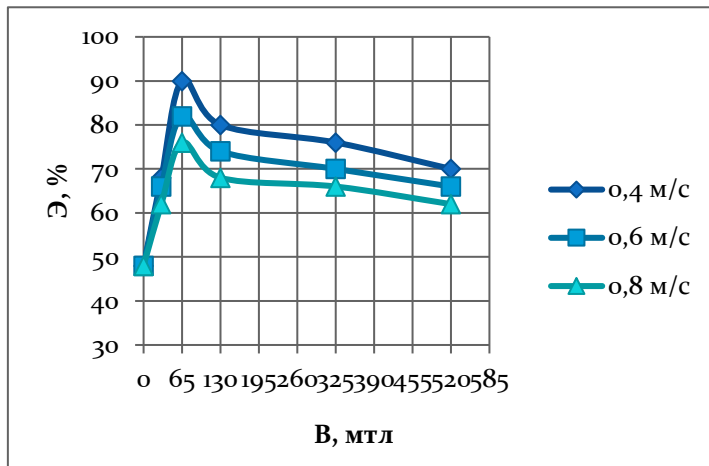
Отримані експериментальні залежності енергії проростання насіння від магнітної індукції, полюсної поділки та швидкості руху в магнітному полі наведені на рис. 2.5. Встановлено, що при збільшенні магнітної індукції в діапазоні 0–0,065 Тл енергія проростання зростає, тоді як при подальшому її підвищенні спостерігається тенденція до зниження цього показника. За значень магнітної індукції понад 0,13 Тл енергія проростання змінюється незначно, але залишається вищою порівняно з контрольними зразками.



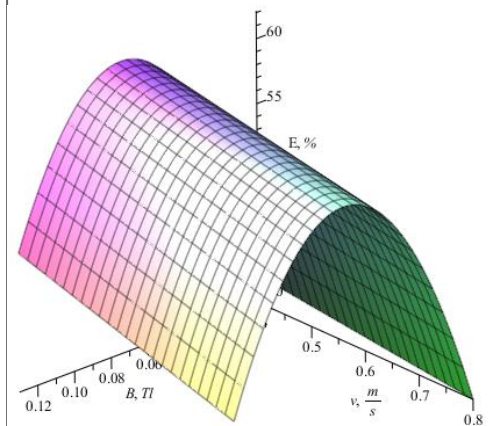
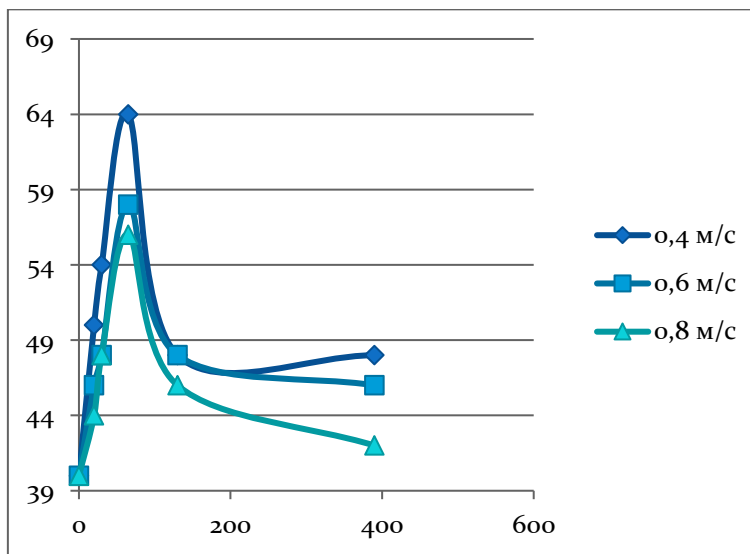
а



б



6



2

Рис. 2.5. Залежності енергії проростання насіння зернових культур від магнітної індукції і швидкості руху насіння в магнітному полі:

а – пшениці; *б* – жита; *в* – ячменю; *г* – кукурудзи

Для встановлення кількісного зв'язку між енергією проростання та параметрами магнітної обробки насіння було використано метод планування експерименту на основі ортогонального центрально-композиційного плану. Це дозволило побудувати математичні моделі багатофакторного процесу та оцінити вплив окремих керуючих факторів.

У результаті проведеного багатофакторного експерименту отримано регресійні рівняння, що описують зміну енергії проростання насіння зернових

культур у функції фізичних параметрів магнітної обробки, які подані у вигляді:

для пшениці

$$E = 80,021 + 680,889 B - 60,889 v + 300 Bv - 5733 B^2; \quad (2.18)$$

для жита

$$E = 55,5 + 821B - 3,61v - 153,85Bv - 4536B^2; \quad (2.19)$$

для ячменю

$$E = 52,907 + 1021B - 8,611v - 153,846 Bv - 6062 B^2; \quad (2.20)$$

для кукурудзи

$$E = 43,91 + 576,92B - 5,28v - 64,1Bv - 3734B^2. \quad (2.21)$$

Окрім магнітної індукції, на енергію проростання насіння впливає також швидкість його переміщення в магнітному полі, однак ступінь її впливу є менш вираженим у порівнянні з індукцією. Встановлено, що максимальні значення енергії проростання для насіння зернових культур досягаються при магнітній індукції 0,065 Тл та швидкості руху 0,4 м/с.

Дослідження впливу полюсної поділки на енергію проростання насіння вівса проводили з використанням плану експерименту Бокса–Бенкіна, що дозволило врахувати взаємодію основних факторів процесу.

У результаті багатофакторного експерименту отримано регресійні залежності для енергії проростання насіння вівса у фізичних величинах, які мають вигляд:

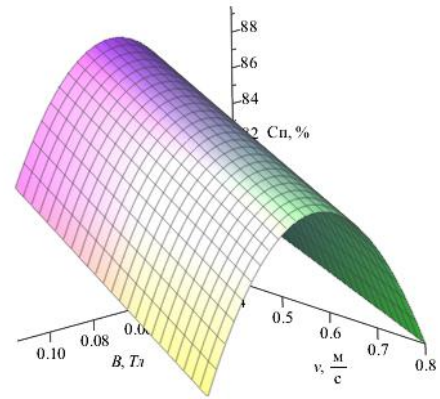
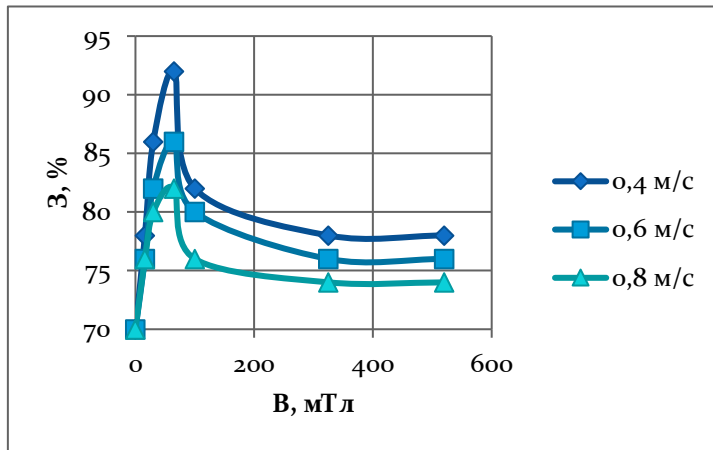
$$E = 42.6 + 6781B - 2.5v - 9.7\tau - 153.9 Bv - 213.7B\tau - 3461.5B^2. \quad (2.22)$$

становлено, що полюсна поділка є другорядним фактором впливу порівняно з магнітною індукцією. У межах варіації $0,23 \pm 0,09$ м зміна енергії проростання насіння не перевищує 3 %, що свідчить про її відносно слабкий вплив на досліджуваний процес.

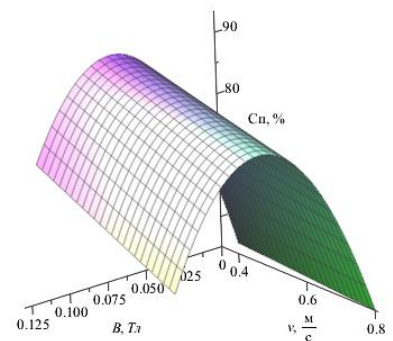
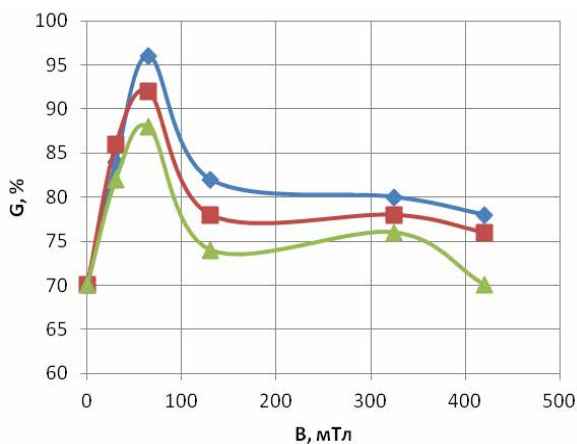
За оптимальних режимів передпосівної обробки насіння в магнітному полі (індукція 0,065 Тл, чотирикратне перемагнічування, полюсна поділка 0,23 м та швидкість руху 0,4 м/с) спостерігалось істотне підвищення енергії

проростання: для пшениці — на 50 %, ячменю — на 42 %, жита — на 30 %, кукурудзи — на 24 % та вівса — на 24 %.

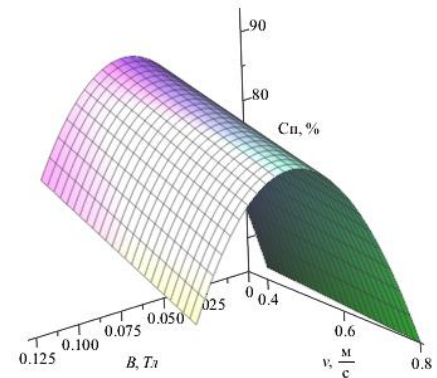
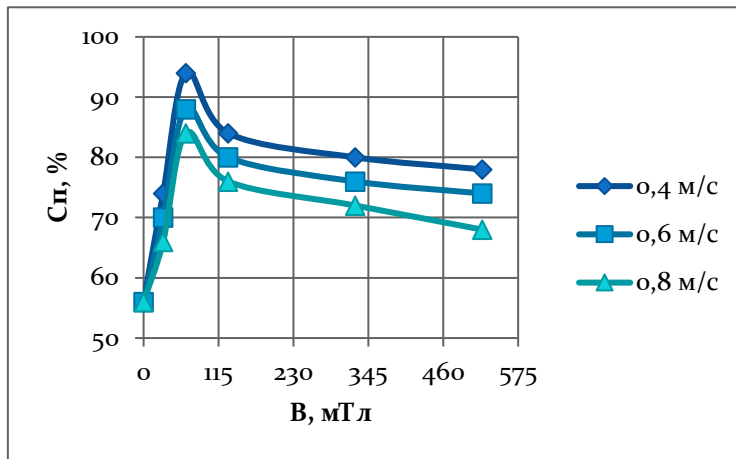
Залежності схожості насіння зернових культур від магнітної індукції та швидкості руху в магнітному полі наведені на рис. 3.6. Встановлено, що при збільшенні магнітної індукції від 0 до 0,065 Тл схожість насіння підвищується, однак при подальшому зростанні індукції спостерігається її зниження. За значень магнітної індукції понад 0,130 Тл схожість стабілізується, залишаючись вищою порівняно з контрольними зразками. Крім того, збільшення швидкості переміщення насіння в магнітному полі призводить до зменшення показників схожості.



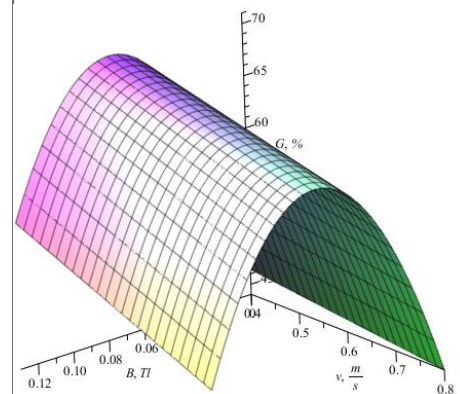
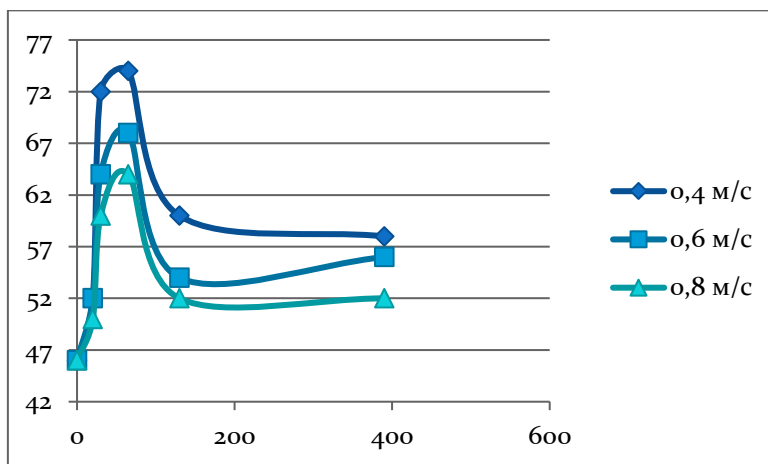
a



б



б



в

Рис. 2.6. Залежності схожості насіння зернових культур від магнітної індукції і швидкості руху насіння в магнітному полі:

а – пшениці; *б* – жита; *в* – ячменю; *г* – кукурудзи

На основі проведеного багатofакторного експерименту встановлено регресійну залежність для показника схожості насіння зернових культур, яка у фізичних величинах записується у вигляді:

для пшениці

$$G = 75,831 + 533,667 B - 9,875 v - 91,667 Bv - 3511 B^2; \quad (2.23)$$

для жита

$$G = 71,61 + 721,82 B - 3,61v - 153,85 Bv - 4339 B^2; \quad (2.24)$$

для ячменю

$$G = 58,63 + 988,034 B - 4,444 v - 192,308 Bv - 5667 B^2; \quad (2.25)$$

для кукурудзи

$$G = 48,81 + 702,4B - 5,97v - 121,79Bv - 4339 B^2. \quad (2.26)$$

Найбільші значення схожості насіння спостерігалися у варіантах обробки, де магнітна індукція становила 0,065 Тл, а швидкість переміщення насіння — 0,4 м/с.

Дослідження впливу полюсної поділки на показники схожості насіння вівса виконувалися із застосуванням плану Бокса–Бенкіна, що дозволило врахувати взаємодію основних режимних факторів процесу. Отримані експериментальні залежності схожості насіння від магнітної індукції, полюсної поділки та швидкості руху в магнітному полі наведені на рис. 2.7.

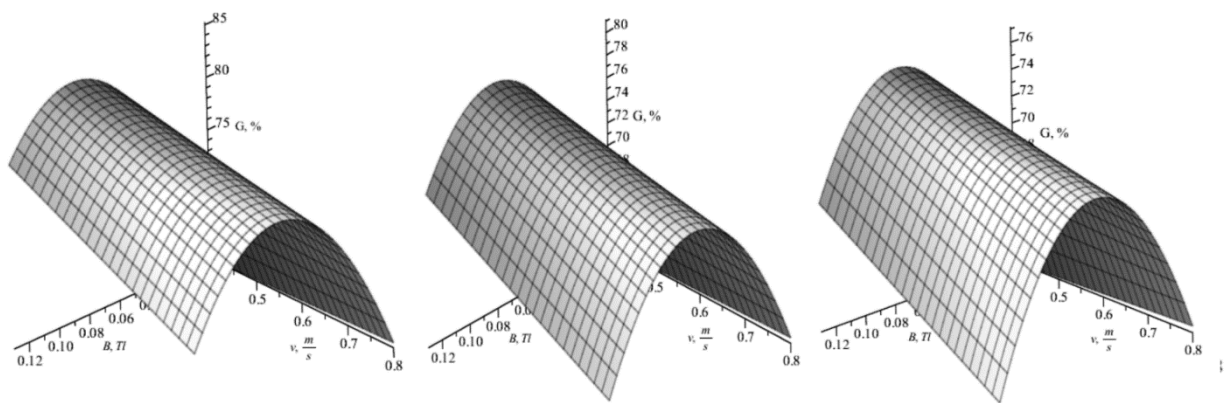


Рис. 2.7.. Залежність схожості насіння вівса від магнітної індукції та швидкості руху насіння в магнітному полі при полюсній поділці:

$a - 0,14$ м; $b - 0,23$ м; $v - 0,32$ м

У результаті проведеного експерименту отримане рівняння регресії, яке у фізичних величинах має вигляд:

$$G = 64,5 + 636,5 B + 1,25 v - 16,7 \tau - 192 Bv - 341,9B \tau - 2899,4 B^2. \quad (2.27)$$

Встановлено, що полюсна поділка є другорядним фактором впливу порівняно з магнітною індукцією. У межах її варіації $0,23 \pm 0,09$ м зміна

показника схожості не перевищує 5 %, що свідчить про її відносно слабкий вплив на процес.

За оптимальних режимів магнітної обробки (індукція 0,065 Тл, чотирикратне перемагнічування, полюсна поділка 0,23 м та швидкість руху насіння 0,4 м/с) спостерігалось суттєве підвищення схожості насіння зернових культур: для пшениці — на 22 %, ячменю — на 38 %, жита — на 26 %, кукурудзи — на 28 % та вівса — на 20 %.

2.7. Вплив замочування насіння в магнітоактивованій воді на енергію проростання і схожість насіння при передпосівній обробці в магнітному полі

За результатами досліджень впливу магнітного поля на зміну рН, окисно-відновного потенціалу (ОВП), електропровідності водного розчину та концентрації розчиненого кисню встановлено, що найбільш ефективний режим магнітної обробки води відповідає індукції 0,065 Тл, чотирикратному перемагнічуванню та швидкості руху розчину 0,4 м/с.

Порівняльний аналіз показників посівних якостей насіння при різних способах підготовки показав, що оптимальні режими магнітної обробки водного середовища та насіння є ідентичними за своїми параметрами. У зв'язку з цим додатково досліджено вплив замочування насіння у магнітоактивованій воді на його посівні властивості.

Експерименти проводили з насінням вівса, попередньо обробленим у магнітному полі. Надалі зразки замочували як у звичайній водопровідній воді, так і у воді, попередньо активованій у магнітному полі за режиму: індукція 0,065 Тл, чотирикратне перемагнічування та швидкість руху 0,4 м/с.

Встановлено, що енергія проростання насіння вівса, обробленого магнітним полем і замоченого у звичайній воді, зростає порівняно з контролем на 21 % за оптимального режиму обробки. У випадку використання магнітоактивованої води цей показник підвищується ще більше — до 25 % (рис. 3.8).

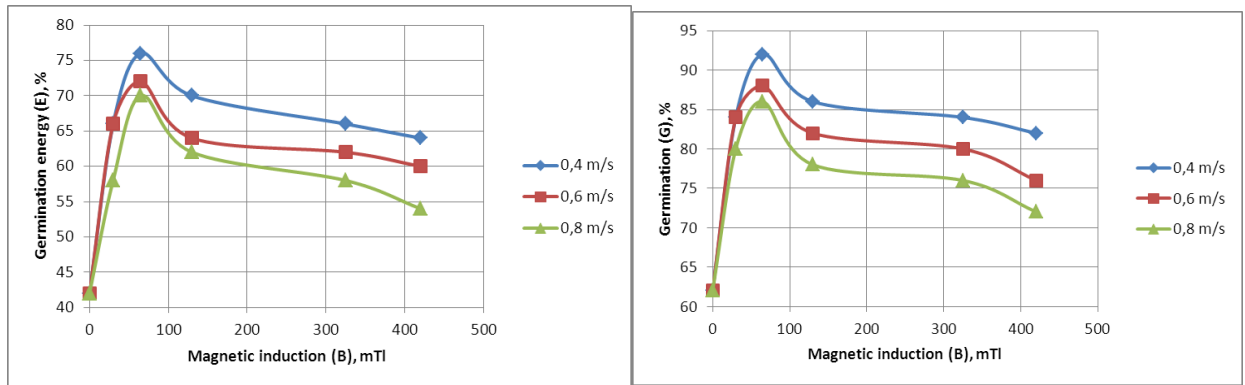


Рис. 2.8. Залежність енергії проростання (а) та схожості (б) насіння вівса, замоченого в магнітоактивованій воді, від магнітної індукції і швидкості руху насіння в магнітному полі:

Обробка насіння вівса магнітним полем із подальшим замочуванням у водопровідній воді забезпечує збільшення його схожості порівняно з контрольними зразками необробленого насіння на 16 %.

У випадку використання насіння, попередньо обробленого в магнітному полі та замоченого в магнітоактивованій воді, спостерігається ще більш виражене підвищення схожості — до 19 % (рис. 4.19).

Таким чином, результати досліджень свідчать, що застосування магнітоактивованої води на етапі замочування сприяє покращенню посівних якостей насіння.

2.8. Зміна енергії проростання і схожості насіння в часі після обробки в магнітному полі

Для оцінювання тривалості збереження ефекту магнітної обробки були проведені дослідження зміни енергії проростання та схожості насіння жита протягом одного місяця після впливу магнітного поля.

Насіння жита обробляли в магнітному полі з індукцією 0,03; 0,065; 0,13; 0,325 та 0,42 Тл при чотирикратному переманіччуванні та швидкості руху 0,4

м/с. Надалі через кожні п'ять діб визначали показники енергії проростання та схожості насіння.

Встановлено, що ефект магнітної обробки зберігається протягом щонайменше одного місяця після обробки. При цьому енергія проростання насіння жита (рис. 3.9, а) за період спостережень знизилася з 82 % до 78 %, тобто на 4 %. Аналогічно схожість зменшилася з 96 % до 92 %, що також становить 4 %.

Водночас протягом усього періоду спостереження енергія проростання та схожість обробленого насіння залишалися вищими порівняно з контрольними зразками. Максимальні значення обох показників фіксувалися при магнітній індукції 0,065 Тл.

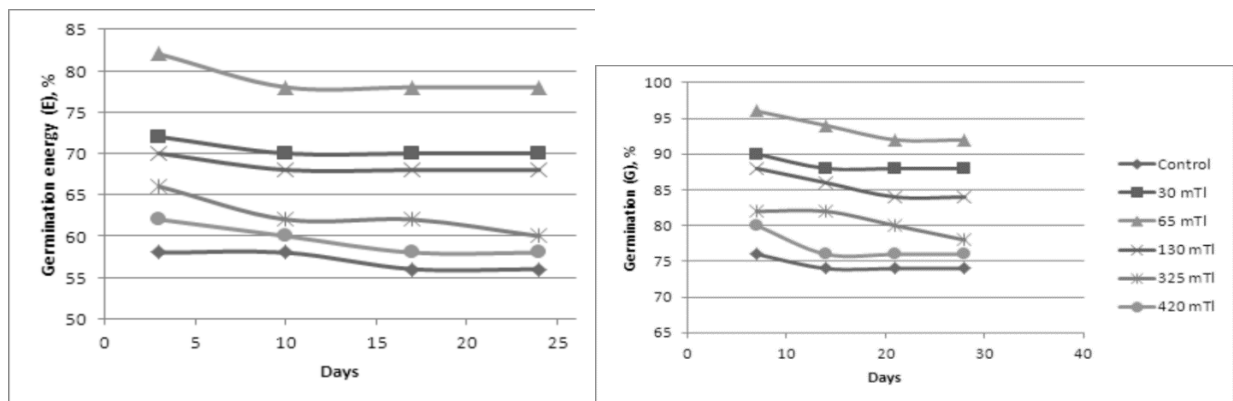


Рис. 2.9. Зміна в часі енергії проростання (а) та схожості (б) насіння жита, обробленого в магнітному полі

2.9. Вплив магнітного поля на біометричні показники зернових культур

Передпосівна обробка насіння в магнітному полі сприяє активізації ростових процесів та позитивно впливає на розвиток рослин.

У результаті спостерігається покращення біометричних показників рослин. На рис. 3.10 наведено приклади розвитку паростків кукурудзи, отриманих із насіння, обробленого в магнітному полі за різних значень магнітної індукції. Найкращі біометричні характеристики відмічено при магнітній індукції 0,065 мТл та швидкості переміщення насіння 0,4 м/с.

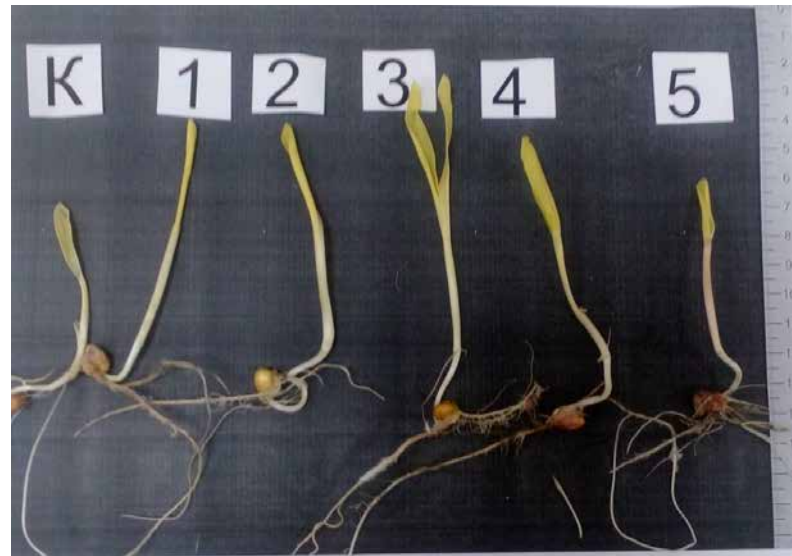


Рис. 2.10. Паростки кукурудзи при обробці насіння в магнітному полі з магнітною індукцією:

1 – 20 мТл; 2 – 30 мТл; 3 – 65 мТл; 4 – 130 мТл; 5 – 190 мТл

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ПЕРЕДПОСІВНОЇ ОБРОБКИ НАСІННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР У МАГНІТНОМУ ПОЛІ

3.1. Обґрунтування структури електротехнологічного комплексу для передпосівної обробки насіння сільськогосподарських культур у магнітному полі

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження дозволили сформулювати вимоги до електротехнологічного комплексу для передпосівної обробки насіння в магнітному полі. Встановлено, що система повинна забезпечувати формування магнітної індукції в центрі повітряного зазору на рівні 0,065 Тл, реалізацію періодичного магнітного впливу при чотирикратному перемагнічуванні, а також підтримання швидкості переміщення насіння 0,4 м/с. З урахуванням забезпечення оптимальної енергетичної дози магнітної обробки полюсна поділка має становити 0,23 м.

Аналіз літературних джерел свідчить, що найбільш доцільним варіантом реалізації передпосівної магнітної обробки є використання установок транспортерного типу. При цьому системи з постійними магнітами характеризуються нижчою вартістю, простішою конструкцією та меншими експлуатаційними витратами порівняно з електромагнітними аналогами.

Розроблений електротехнологічний комплекс для передпосівної обробки насіння в магнітному полі включає стрічковий транспортер і пристрій магнітної обробки з використанням постійних магнітів. Конструктивно передбачено встановлення чотирьох пар магнітів на основі сплаву NdFeB, розміщених попарно над і під стрічкою транспортера зі змінною полярністю. Магніти закріплені на сталевій плиті зі сталі Ст2211, а міжмагнітні проміжки заповнені елементами з текстоліту для стабілізації конструкції.

Конструкція транспортера передбачає використання чотирьох опорних роликів, що забезпечує можливість монтажу магнітної плити під стрічкою. Рама транспортера в зоні встановлення магнітних модулів виконана з нержавіючої сталі. Привід транспортера реалізовано від трифазного асинхронного електродвигуна через редуктор з пониженням частоти обертання.

3.2. Моделювання магнітного поля та обґрунтування геометрії пристрою для магнітної обробки з періодичною магнітною системою

Теоретичні дослідження магнітного поля пристрою для обробки насіння та аналіз його параметрів виконувалися із застосуванням спеціалізованого програмного комплексу ELCUT. Дане програмне забезпечення дозволяє проводити чисельне моделювання геометричних об'єктів, встановлювати взаємозв'язки між їх конструктивними параметрами, фізичними властивостями матеріалів, джерелами поля та заданими граничними умовами.

Програмний пакет ELCUT використовується для розв'язання як лінійних, так і нелінійних задач магнітостатики у плоскій та осесиметричній постановках. Джерелами магнітного поля можуть виступати як зосереджені, так і розподілені струми, струмові шари, постійні магніти, а також зовнішні магнітні поля.

При розв'язанні зазначених задач застосовується рівняння Пуассона відносно векторного магнітного потенціалу A , де $B = \text{rot } A$ (B — вектор магнітної індукції). У даному випадку вектор індукції B розташований у площині моделі (xy або zr), тоді як векторний потенціал A є перпендикулярним до цієї площини. У плоско-паралельній постановці ненульовими є лише компоненти j_z та A_z , які позначаються як j та A відповідно. Для плоско-паралельних задач рівняння Пуассона записується у вигляді:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -j + \left(\frac{\partial H_{cy}}{\partial x} - \frac{\partial H_{cx}}{\partial y} \right) \quad (3.1)$$

де μ_x і μ_y – компоненти магнітної проникності, H_{cx} і H_{cy} – складові коерцитивної сили, j – густина струму. Дані величини постійні в межах кожного із блоків моделі.

У нелінійній постановці задачі магнітостатики магнітні властивості матеріалів приймаються ізотропними ($\mu_x = \mu_y$), а їх поведінка описується залежністю $B = f(H)$, яка задається у вигляді кубічного сплайна.

При формуванні чисельної моделі на внутрішніх та зовнішніх межах розрахункової області використовується гранична умова Діріхле.

Суть граничної умови Діріхле полягає у заданні на визначених ділянках границі відомого значення векторного магнітного потенціалу A_0 у вузлах або на ребрах моделі. Така умова визначає характер поведінки нормальної складової магнітної індукції на межі області. Найчастіше вона застосовується для задання нульового потенціалу, зокрема на осях симетрії або для моделювання затухання поля на віддалених межах розрахункової області.

Нульова гранична умова Діріхле використовується для опису зовнішніх меж моделі та меж плоско-паралельних задач. У цьому випадку силові лінії магнітного поля не перетинають задану границю, що еквівалентно умові $B_n = 0$, де нормальна складова магнітної індукції дорівнює нулю.

Для розв'язання відповідної задачі магнітостатики була побудована геометрична модель у програмному середовищі ELCUT, яка наведена на рис. 3.1а.

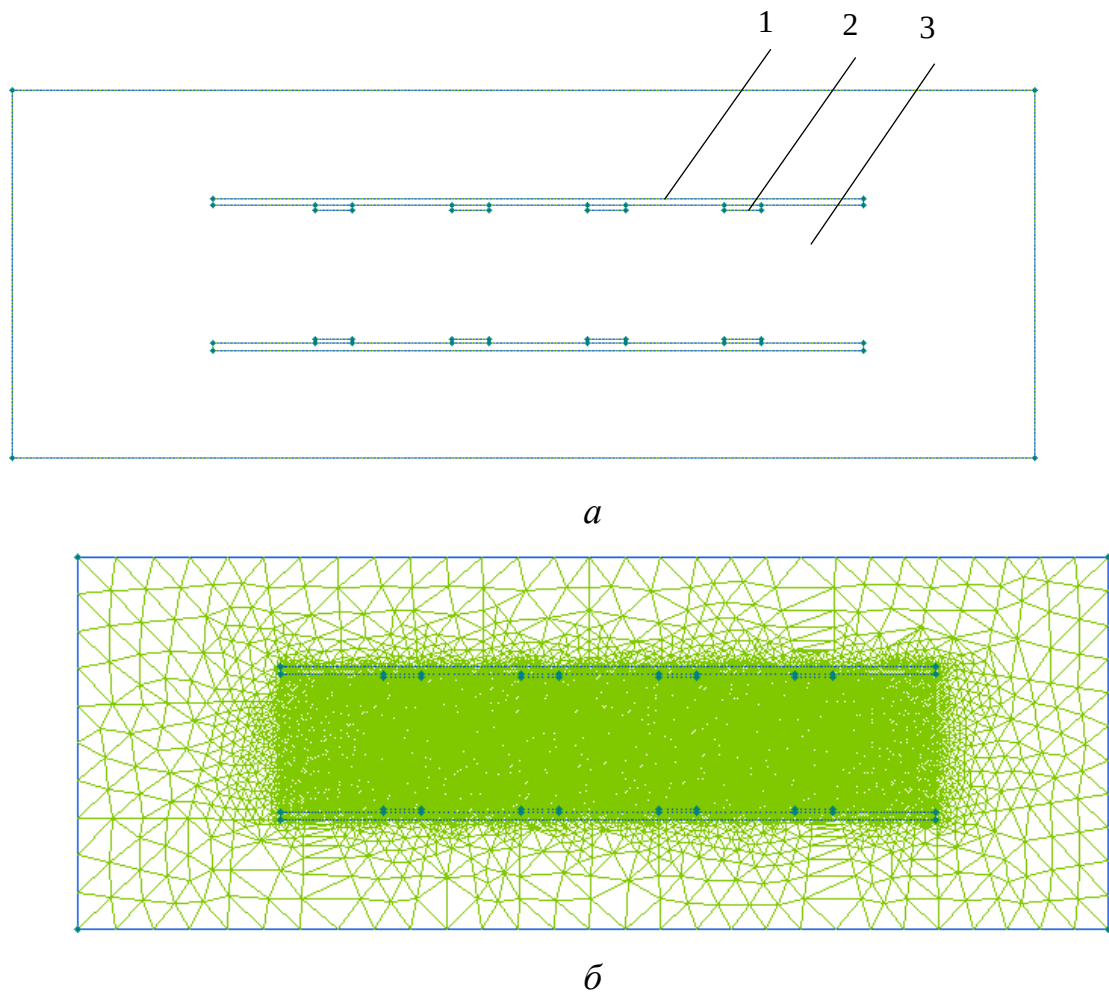


Рис. 3.1. *а* – геометрична модель установки для магнітної обробки картоплі в програмному середовищі ELCUT:

1 – феромагнітна плити, 2 – постійні магніти, 3 – область повітря;

б – розподіл області геометричної моделі на кінцеві елементи та кількість вузлів сітки

Точність чисельного розрахунку методом скінченних елементів значною мірою визначається характером дискретизації розрахункової області, зокрема способом її поділу на кінцеві елементи та кількістю вузлів побудованої сітки (рис. 3.1, б). При формуванні геометричної моделі в середовищі ELCUT розбиття області виконувалося таким чином, щоб максимальна щільність сітки припадала на найбільш критичні ділянки моделі, а саме повітряний зазор, феромагнітні елементи та постійні магніти.

На основі розробленої імітаційної моделі ELCUT проведено аналіз роботи установки для магнітної обробки насіння. Встановлено, що забезпечення

магнітної індукції 0,065 Тл у центрі повітряного зазору досягається при використанні чотирьох пар постійних магнітів з інтерметалічного композиту NdFeB марки N38SH розмірами $400 \times 55 \times 6,3$ мм, закріплених на сталевій плиті зі сталі Ст3 товщиною 10 мм. Полісна поділка становить 230 мм, а величина повітряного зазору — 120 мм.

Отримана модель розподілу магнітного поля відображає напрямки векторів магнітної індукції та характер її просторового розподілу в поперечному перерізі досліджуваного об'єкта (рис. 3.2).

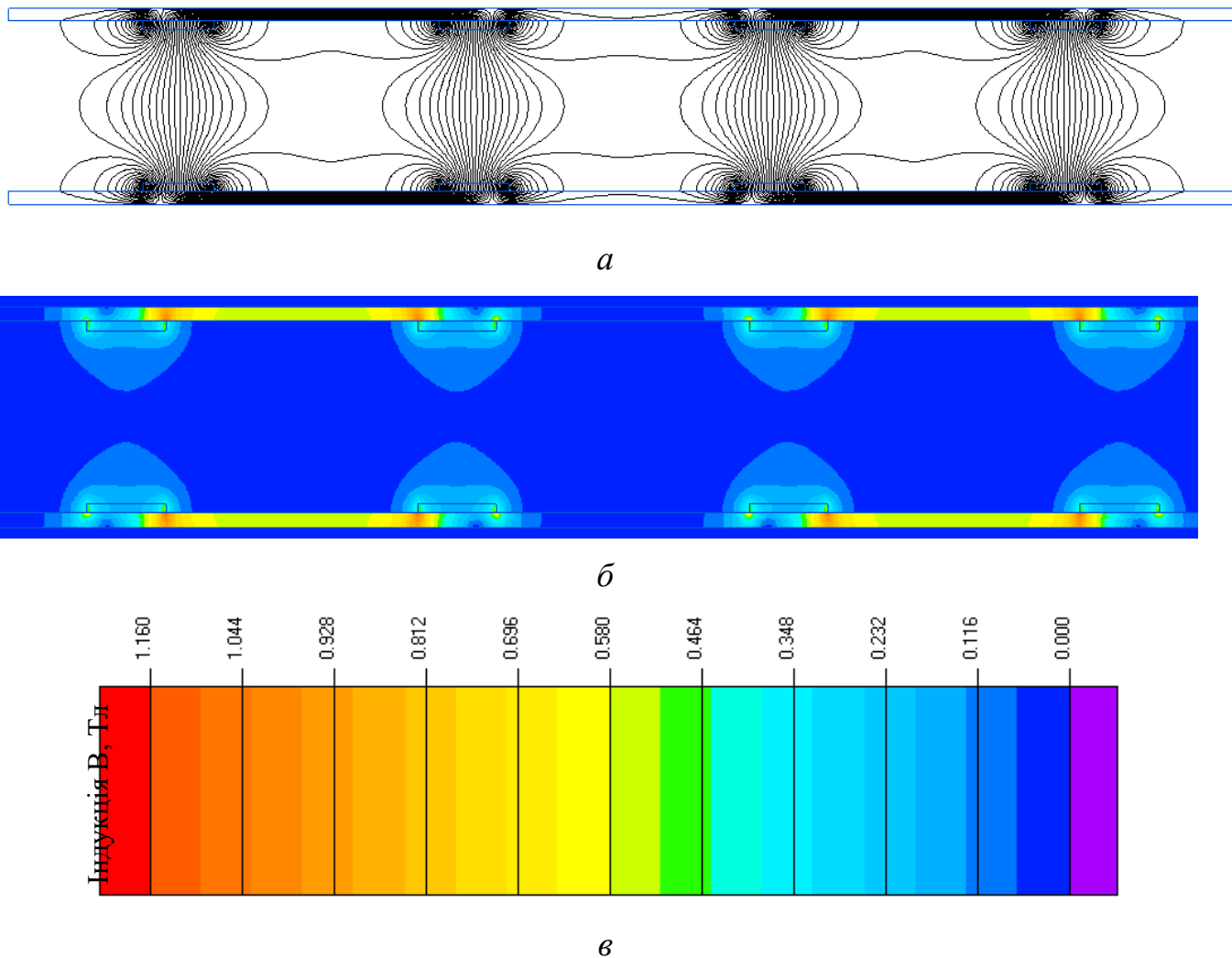


Рис. 3.2. Картина магнітного поля установки для магнітної обробки насіння (а), розподіл модуля магнітної індукції (б) та величина модуля магнітної індукції (в)

Розподіл магнітної індукції вздовж транспортерної стрічки в центрі повітряного зазору наведено на рис. 3.3.

З аналізу отриманої залежності випливає, що величина магнітної індукції змінюється в процесі переміщення оброблюваного матеріалу вздовж робочої зони транспортера. Максимальне значення індукції фіксується в області встановлення постійних магнітів.

У міру переміщення матеріалу вздовж стрічки від одного магнітного модуля до іншого спостерігається спадання індукції до мінімальних значень, на $\sim$ до нуля в проміжній зоні між магнітами. Далі, зі зміною напрямку поля, відбувається зміна знака індукції та її подальше зростання.

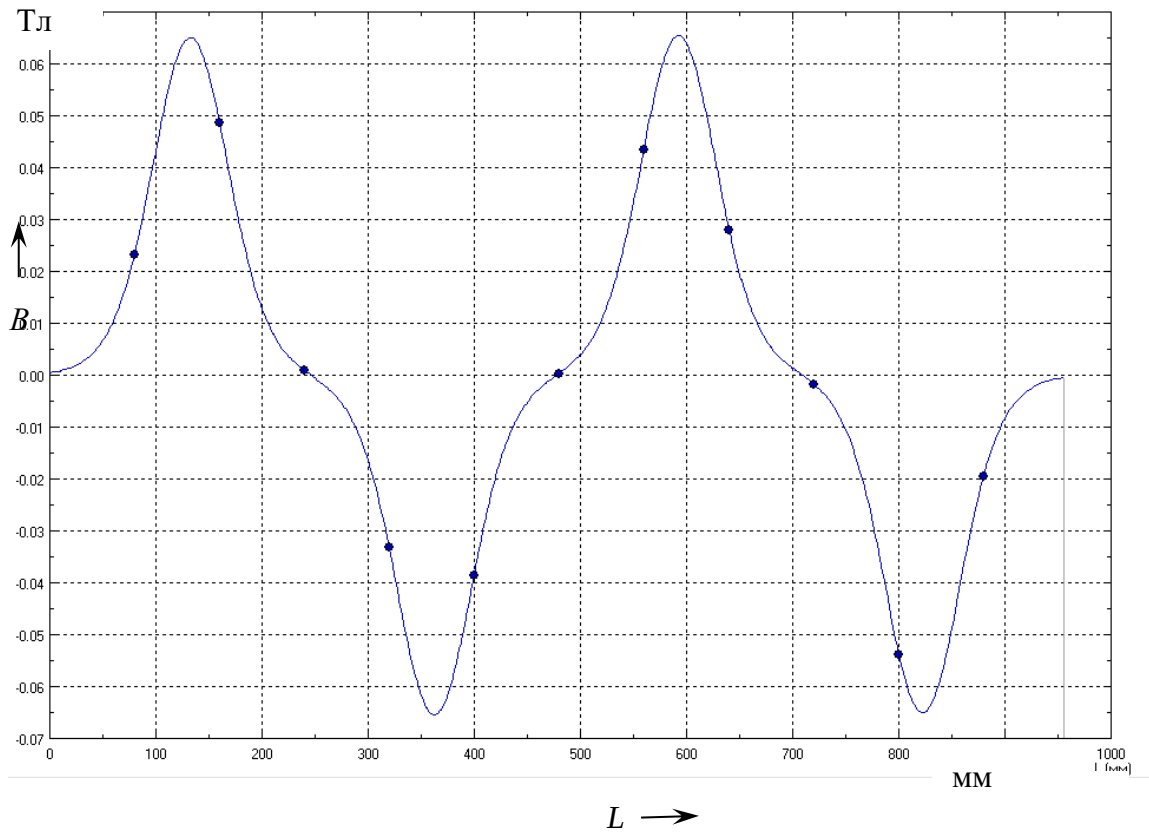


Рис. 3.3. Залежність зміни магнітної індукції у центрі повітряного зазору вздовж транспортерної стрічки

3.3. Експериментальні дослідження електротехнологічного комплексу для передпосівної обробки насіння сільськогосподарських культур у магнітному полі

Експериментальні дослідження пристрою для передпосівної обробки насіння виконували шляхом вимірювання магнітної індукції у різних точках повітряного зазору за допомогою тесламетра 43205.

Під час дослідження просторового розподілу магнітної індукції між транспортерною стрічкою та центрами магнітів вимірювання здійснювали з кроком 1 см від центра нижнього магніту до центра верхнього. Експерименти проводили у триразовій повторності, а їх відтворюваність оцінювали за критерієм Кохрена.

Оскільки розрахункове значення критерію Кохрена (0,08) є меншим за критичне (0,27), можна зробити висновок, що результати дослідів є відтворюваними з імовірністю 95 %.

Залежність магнітної індукції від відстані між транспортерною стрічкою та центрами магнітів наведено на рис. 3.4.

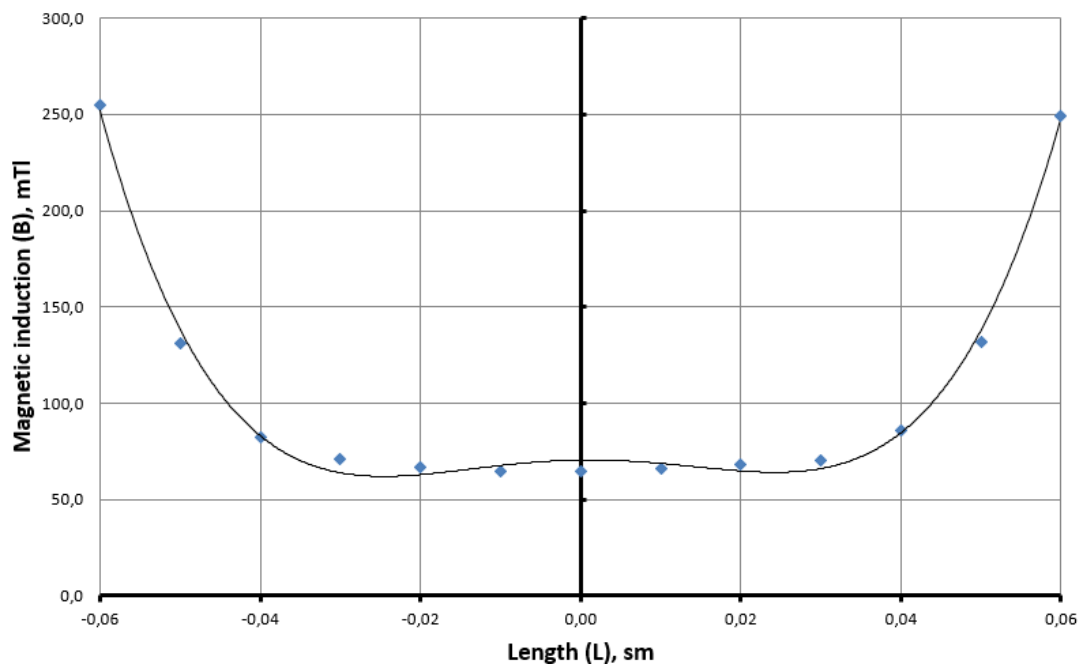


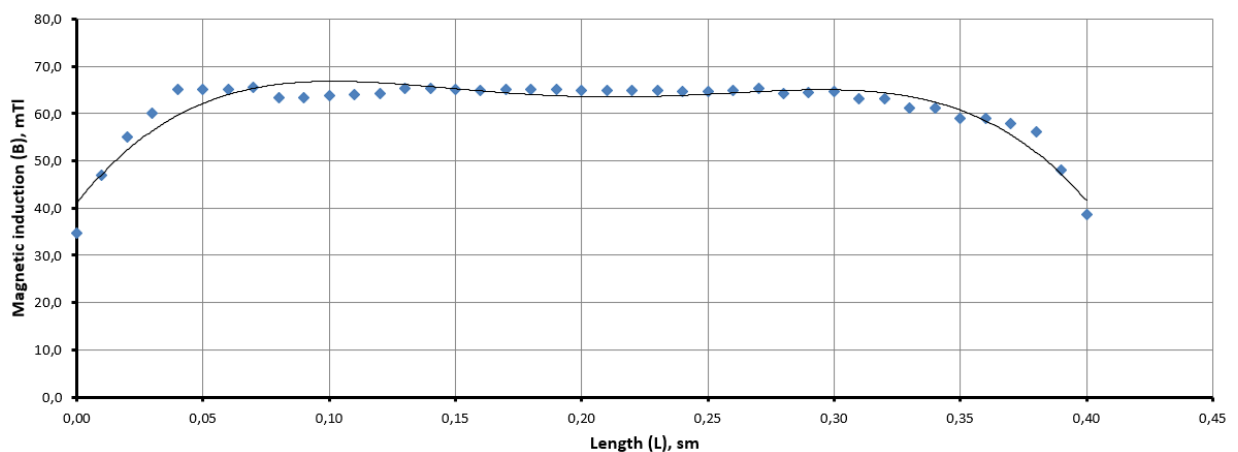
Рис.3.4. Залежність магнітної індукції від відстані між транспортерною стрічкою і центрами магнітів

Дослідження просторової зміни магнітної індукції в центрі повітряного зазору між магнітами поперек транспортерної стрічки виконували шляхом дискретних вимірювань із кроком 1 см за допомогою тесламетра. Експерименти проводилися у триразовій повторності, а відтворюваність результатів оцінювали за критерієм Кохрена.

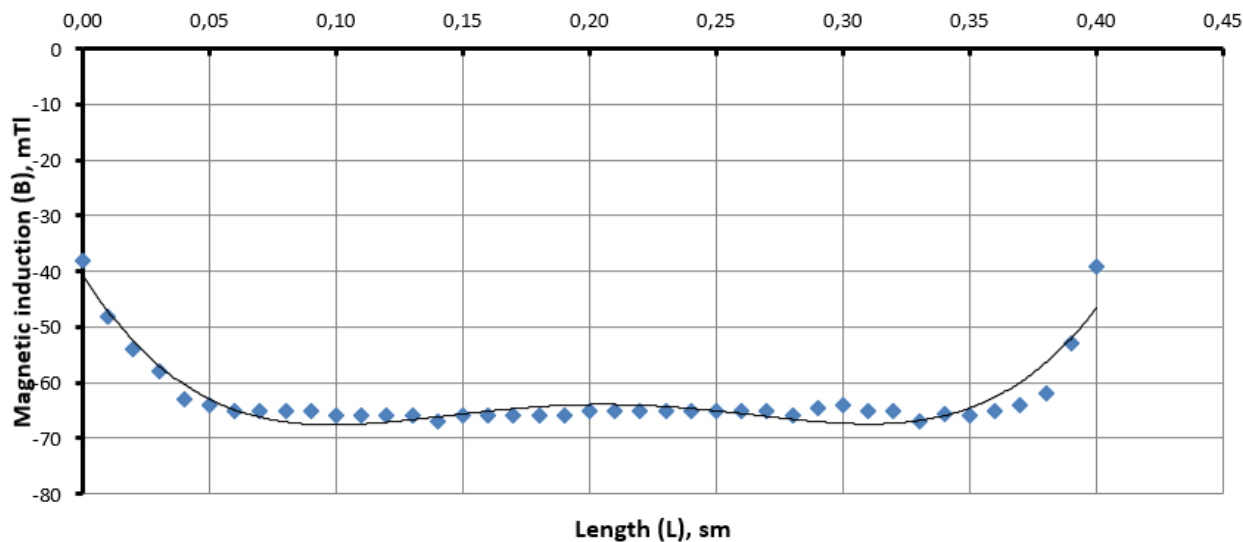
Встановлено, що розрахункове значення критерію Кохрена (0,07) є меншим за критичне (0,16), що свідчить про відтворюваність результатів із довірчою ймовірністю 95 %.

Залежність розподілу магнітної індукції у центрі повітряного зазору між магнітами поперек стрічки транспортера за різної полярності магнітів наведено на рис. 3.5.

На основі аналізу результатів досліджень (рис. 3.4, 3.5) встановлено, що відхилення значень магнітної індукції в робочій зоні від оптимального рівня 0,065 Тл не перевищує 5 %, що підтверджує стабільність магнітного поля в межах робочого режиму.



a



б

Рис.3.5. Залежність зміни магнітної індукції у центрі повітряного зазору між магнітами поперек стрічки транспортера при різних полярностях магнітів:

а – N-S; б – S-N

Під час дослідження просторового розподілу магнітної індукції в центрі повітряного зазору вздовж осі транспортера вимірювання виконували з кроком 1 см. Експериментальні дослідження проводили у трикратній повторності, а відтворюваність результатів оцінювали за критерієм Кохрена.

Адекватність побудованої математичної моделі перевіряли за допомогою критерію Фішера. Встановлено, що розрахункове значення критерію Фішера (0,29) є меншим за критичне (1,19), що свідчить про адекватність моделі експериментальним даним.

Також встановлено, що розбіжність між експериментальними та розрахунковими значеннями не перевищує 5 %, що підтверджує коректність отриманих результатів.

Залежність зміни магнітної індукції в центрі повітряного зазору вздовж осі транспортера наведено на рис. 3.6.

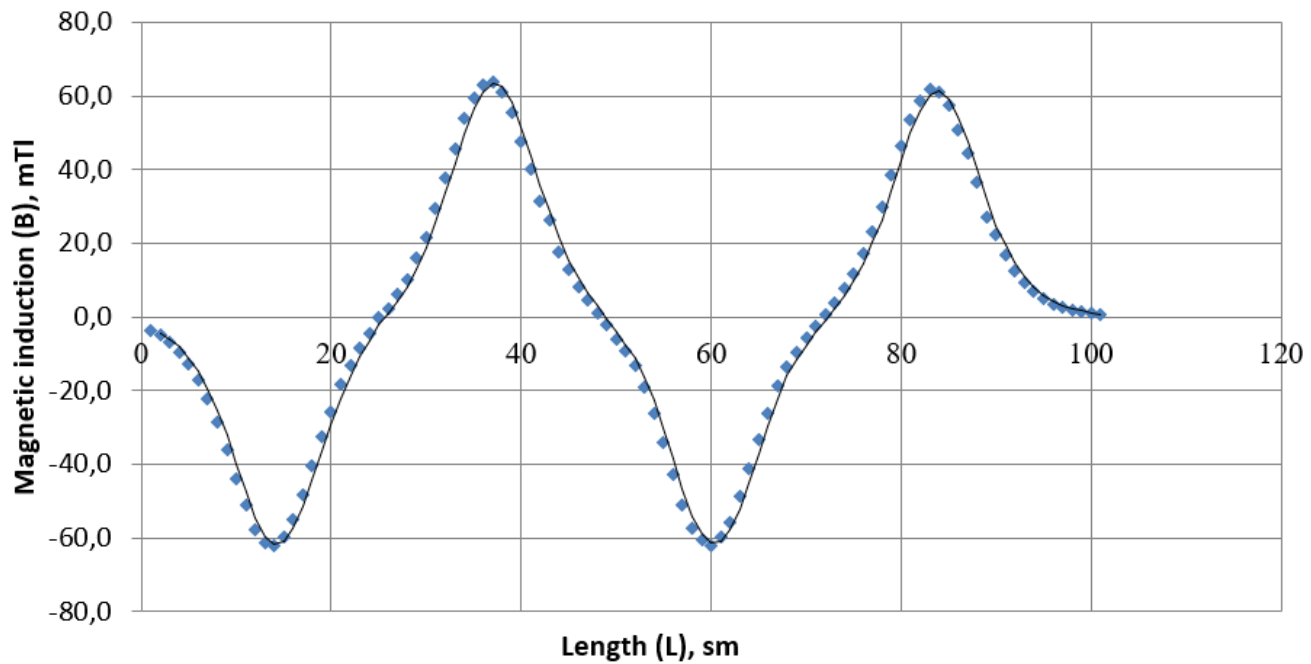


Рис. 3.6. Експериментальна залежність зміни магнітної індукції у центрі повітряного зазору вздовж осі транспортера

3.4. Дослідження електропривода транспортера електротехнологічного комплексу для передпосівної обробки насіння в магнітному полі

3.4.1. Визначення тягового зусилля на приводному барабані та потужності електродвигуна

Геометрична схема транспортера показана на рис. 3.7.

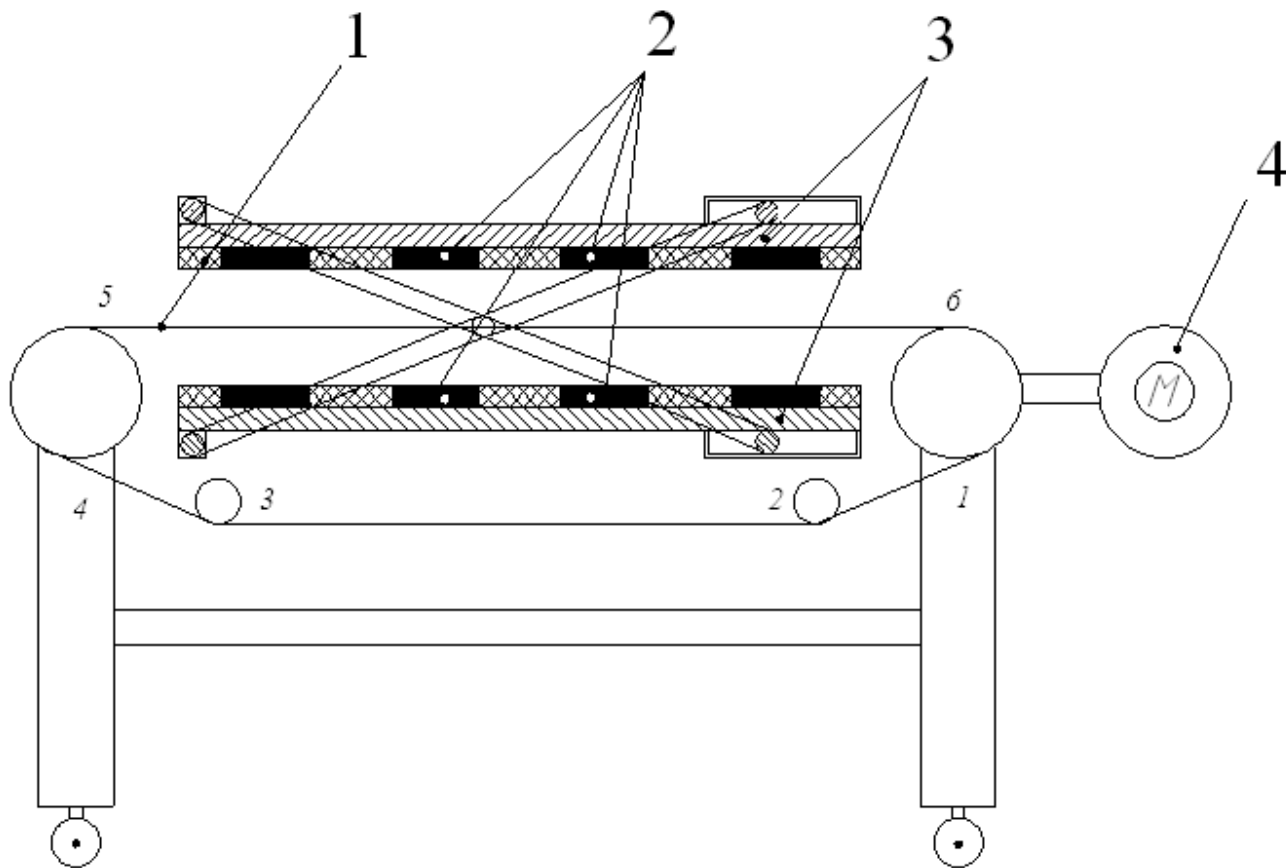


Рис. 3.7. Геометрична схема транспортера

Опори руху та натягування стрічки визначаємо у відповідних точках схеми транспортера (рис. 6.8):

$$F_2 = F_1 \varepsilon \quad (3.2)$$

де ε – коефіцієнт опору на відхиляючому барабані, $\varepsilon=1,02$.

$$F_3 = F_2 + (q_c + q_{nn}) l k_n = F_1 \varepsilon + (q_c + q_{nn}) l k_n \quad (3.3)$$

де q_c – навантаження від 1 погонного метра транспортерної стрічки, кг/м; q_{nn} – погонне навантаження від обертових частин роликоопор, кг/м; l – довжина холостої вітки, м; k_n – коефіцієнт опору роликоопор, $k_n=0,022$.

$$F_4 = F_3 \varepsilon = F_1 \varepsilon^2 + (q_c + q_{nn}) l k_n \varepsilon. \quad (3.4)$$

$$F_5 = F_4 k_1 = F_1 k_1 \varepsilon^2 + (q_c + q_{nn}) l k_n k_1 \varepsilon, \quad (3.5)$$

де k_1 – коефіцієнт збільшення натягування стрічки при огинанні барабану, $k_1=1,05$.

$$F_6 = F_5 + (q_6 + q_c + q_{nж}) l k_{ж} + F_{зав} + F_{борт}, \quad (3.6)$$

де $k_{жс}$ – коефіцієнт опору роликоопору, $k_{жс}=0,025$; q_6 – навантаження від транспортованого вантажа, кг/м; $q_{пжс}$ – погонне навантаження від жолобчатих роликоопору, м;

$$q_6 = \rho B h, \quad (3.7)$$

де ρ – питома густина транспортованого матеріалу, кг/м³; B – ширина стрічки, м; h – висота транспортованого матеріалу, м; $F_{зав}$ – опір завантажувального пристрою, кг; $F_{борт}$ – опір бортів лотка.

Опір завантажувального пристрою:

$$F_{зав} = \frac{l_6}{B_6} q_6 h'_3 + G k_{жс}, \quad (3.8)$$

де l_6 – довжина завантажувальної воронки, м; B_6 – ширина воронки, м; h'_3 – коефіцієнт, $h'_3=0,5$; G – сила тиску вантажу на стрічку:

$$G = 0,1 Q \sqrt{h_1}, \quad (3.9)$$

де Q – продуктивність транспортера, кг/с, h_1 – висота падіння вантажу, м, $h_1=0,1$ м.

Тоді із (6.8) і (6.9) отримаємо:

$$F_{зав} - \frac{l_6}{B_6} q_6 h'_3 + 0,1 q_6 v \sqrt{h_1} k_{жс} = q_6 \left(\frac{l_6}{B_6} h'_3 + 0,1 v \sqrt{h_1} k_{жс} \right). \quad (3.10)$$

Опір бортів лотка:

$$F_{борт} = f h^2 \rho n_6 l, \quad (3.11)$$

де f – коефіцієнт тертя об стінки лотка, $f=0,8$; h – висота вантажів біля бортів, м; n_6 – коефіцієнт бокового тиску;

$$n_6 = \frac{1,2 + v}{1 + 2 f_6^2}, \quad (3.12)$$

де f_6 – коефіцієнт внутрішнього тертя, $f_6=0,7$.

$$n_6 = \frac{1,2 + 0,4}{1 + 2 \cdot 0,7^2} = 0,81.$$

Тоді

$$F_6 = F_1 k_1 \varepsilon^2 + (q_c + q_{nn}) l k_n k_1 \varepsilon + (\rho B h + q_c + q_{n\text{ж}}) l k_{\text{ж}} + \rho B h \left(\frac{l_6}{B_6} h'_3 + 0,1 v \sqrt{h_1} k_{\text{ж}} \right) + f h^2 \rho n_\delta l \quad (3.13)$$

Силу F_6 можна визначити за формулою:

$$F_6 = F_1 e^{\mu a} \quad (3.14)$$

де $e^{\mu a}$ – тяговий фактор, $e^{\mu a} = 2,56$.

Тоді із (3.13) і (3.14) отримаємо:

$$F_1 = \frac{1}{e^{\mu a} - k_1 \varepsilon^2} (l k_n k_1 \varepsilon (q_c + q_{nn}) + l k_{\text{ж}} (q_c + q_{n\text{ж}}) + \rho (B h l k_{\text{ж}} + B h \left(\frac{l_6}{B_6} h'_3 + 0,1 v \sqrt{h_1} k_{\text{ж}} \right) + f h^2 n_\delta l) \quad (3.15)$$

Тягове зусилля на приводному барабані

$$F_c = F_6 - F_1 = F_1 (e^{\mu a} - 1) \quad (3.16)$$

Тоді з урахуванням (6.15) отримаємо

$$F_c = \frac{e^{\mu a} - 1}{e^{\mu a} - k_1 \varepsilon^2} (l k_n k_1 \varepsilon (q_c + q_{nn}) + l k_{\text{ж}} (q_c + q_{n\text{ж}}) + \rho (B h l k_{\text{ж}} + B h \left(\frac{l_6}{B_6} h'_3 + 0,1 v \sqrt{h_1} k_{\text{ж}} \right) + f h^2 n_\delta l) \quad (3.17)$$

Якщо у формулу (3.17) підставити відповідні значення величин, отримаємо:

$$F_c = \frac{2,56 - 1}{2,56 - 1,05 \cdot 1,02^2} (1,25 \cdot 0,022 \cdot 1,05 \cdot 1,02 (3,2 + 9,6) + 1,25 \cdot 0,025 (3,2 + 24) + \rho (0,4 \cdot 0,02 \cdot 1,25 \cdot 0,025 + 0,4 \cdot 0,02 \left(\frac{0,3}{0,3} 0,5 + 0,1 \cdot 0,4 \sqrt{0,5} \cdot 0,025 \right) + 0,8 \cdot 0,02^2 \cdot 0,31 \cdot 1,25) = 1,3 + 0,0049 \rho \quad (3.18)$$

Для насіння пшениці при густині $\rho = 770 \text{ кг/м}^3$ розрахункове значення сили становить $F_c = 5,07 \text{ кг}$.

Потужність електродвигуна привода транспортера визначається за залежністю:

$$P = \frac{K_3 F_c v}{102 \eta_n}, \quad (3.19)$$

де K_3 – коефіцієнт запасу, $K_3=1,25$; η_n – ККД передачі, $\eta_n=0,87$.

$$P = \frac{1,25 \cdot 5,07 \cdot 0,4}{102 \cdot 0,87} = 0,029 \text{ кВт}.$$

Для привода транспортера обрано мотор-редуктор типу 5GN20K у комплекті з електродвигуном 5IK40W-GN. Номінальна потужність двигуна становить 40 Вт, частота обертання — 1300 об/хв, номінальний крутний момент — 0,295 Н·м, пусковий момент — 0,65 Н·м.

Мотор-редуктор має передаточне число $i = 20$, при цьому номінальний момент на вихідному валу становить 5 Н·м.

3.4.2. Дослідження приводних характеристик двигуна

Під час проектування та дослідження електропривода робочої машини необхідно враховувати її приводні характеристики, які, як правило, визначаються експериментальним шляхом [38]. У зв'язку з цим були проведені експериментальні дослідження приводних характеристик транспортера електротехнологічного комплексу для магнітної обробки насіння [39].

Момент інерції транспортера в режимі холостого ходу визначали експериментально методом падаючих вантажів. На приводний шків радіусом $R = 0,05$ м намотували трос, до якого підвішували вантажі масою $m_1 = 0,05$ кг та $m_2 = 0,02$ кг. Вантажі створювали момент, що перевищував момент опору руху машини, забезпечуючи її розгін.

Вантажі скидали з висоти $h = 1$ м, при цьому фіксували час їхнього падіння t_1 і t_2 , який становив відповідно 2 с та 1 с. На основі отриманих даних визначали прискорення руху вантажів:

$$a_1 = \frac{2h}{t_1^2}, \quad a_2 = \frac{2h}{t_2^2}, \quad (3.20)$$

яке відповідно склало 0,5 і 2 м/с².

Масу обертових частин визначали за формулою:

$$m_x = \frac{m_2(g - a_2) - m_1(g - a_1)}{a_2 - a_1}, \quad (3.21)$$

де m_x – маса обертових частин, яка становила 0,14 кг

Тоді можна визначити зведений до валу двигуна момент інерції:

$$J_x = m_x R^2. \quad (3.22)$$

Зведений до валу двигуна момент інерції транспортера в режимі холостого ходу, визначений експериментально методом падаючих вантажів, становить $3,5 \cdot 10^{-4}$ кг·м².

Для завантаженого транспортера зведений до вала двигуна момент інерції визначається за залежністю:

$$J_x = J_p + J_x + \frac{v^2}{\omega_\partial^2} \rho B h l, \quad (3.23)$$

де J_p – момент інерції ротора електродвигуна, кг·м², $J_p = 2,7 \cdot 10^{-4}$ кг·м²; ω – кутова швидкість електродвигуна, с⁻¹, $\omega_\partial = 145,4$ с⁻¹.

Тоді

$$J_x = 6,2 \cdot 10^{-4} + 7,57 \cdot 10^{-8} \rho. \quad (3.24)$$

Зведений момент статичних опорів транспортера визначається за формулою:

$$M_c = \frac{g v (e^{\mu \alpha} - 1)}{\eta \omega_\partial (e^{\mu \alpha} - k_1 \varepsilon^2)} (l k_n k_1 \varepsilon (q_c + q_{nn}) + l k_{\text{жс}} (q_c + q_{n\text{жс}}) + \rho (B h l k_{\text{жс}} + B h \left(\frac{l_6}{B_6} h'_3 + 0,1 v \sqrt{h_1} k_{\text{жс}} \right) + f h^2 n_\partial l) \quad (3.25)$$

Вираз (3.25) можна представити у вигляді:

$$M_c = M_{\text{схх}} + 1,52 \cdot 10^{-4} \rho, \quad (3.26)$$

де $M_{\text{схх}}$ – момент статичних опорів транспортера на холостому ході.

Експериментальне визначення механічної характеристики транспортера здійснювали із застосуванням тарувальної установки, як якої використовували

двигун постійного струму з незалежним збудженням. Такий підхід дозволив отримати достовірні дані щодо залежності навантажувальних параметрів від режимів роботи привода.

За результатами досліджень встановлено, що для стрічкового транспортера момент статичних опорів практично не залежить від кутової швидкості обертання (рис. 3.8). Водночас його величина визначається фізико-механічними властивостями та видом транспортованого матеріалу (табл. 3.1), що обумовлює змінність навантаження привода в залежності від умов експлуатації.

$$M_c = 0,04 + 1,52 \cdot 10^{-4} \rho = \text{const.} \quad (3.27)$$

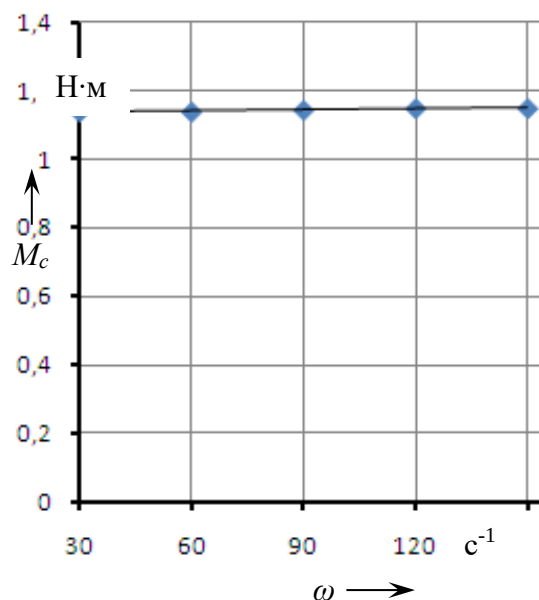


Рис. 3.8. Механічна характеристика транспортера електротехнологічного комплексу для передпосівної обробки насіння в магнітному полі:

Із рівняння механічної характеристики транспортера (3.27) випливає, що момент статичних опорів перебуває у прямій залежності від густини транспортованого насіння. Зміна фізико-механічних властивостей матеріалу, що переміщується, зумовлює відповідну варіацію моменту опору, а отже — і коливання кутової швидкості привода.

Аналіз механічних характеристик приводного двигуна у взаємозв'язку з характеристиками транспортера під час транспортування насіння різних

сільськогосподарських культур (рис. 3.9) показав, що відхилення кутової швидкості від усталеного режиму не перевищує 2,3 %. Такий рівень зміни вважається допустимим для процесу магнітної обробки насіння і не впливає на стабільність технологічного режиму.

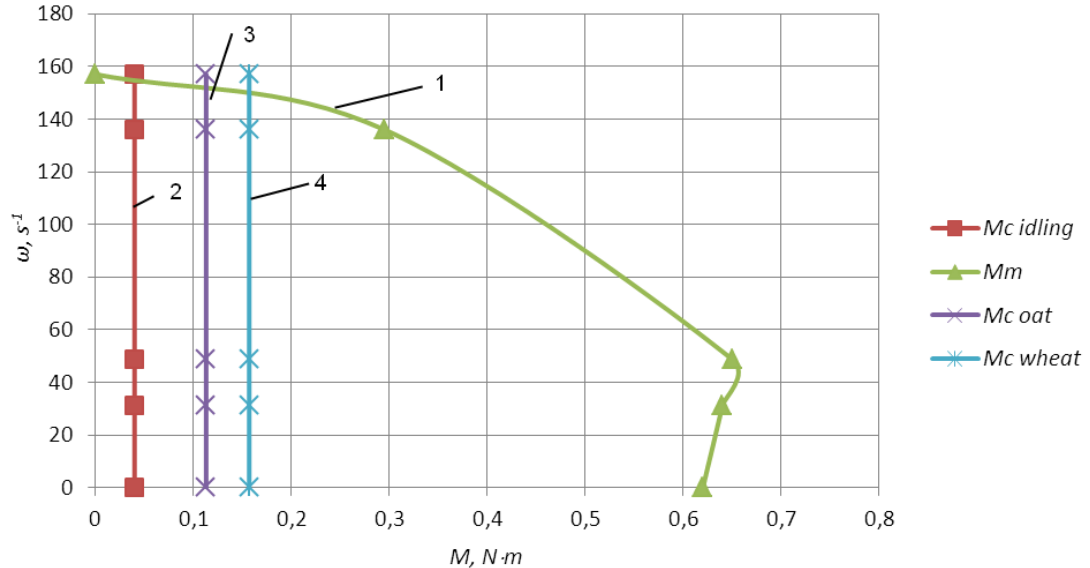


Рис. 3.9. Механічні характеристики електродвигуна (1) і транспортера:
2 – на холостому ході; 3 – при транспортуванні вівса; 4 – при
транспортуванні пшениці

Таблиця 3.1

Приводні характеристики транспортера

Вид транспортованого матеріалу	Густина, кг/м ³	Момент статичних опорів, Н·м	Момент інерції, кг·м ²	Навантажувальна характеристика	
				$M_{сноч},$ Н·м	$\gamma, \text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$
Холостий хід	-	0,04	$6,2 \cdot 10^{-4}$	0,04	0
Пшениця	770	0,157	$6,78 \cdot 10^{-4}$	0,128	0,058
Жито	715	0,149	$6,74 \cdot 10^{-4}$	0,122	0,054
Ячмінь	600	0,131	$6,65 \cdot 10^{-4}$	0,108	0,046
Кукурудза	720	0,15	$6,75 \cdot 10^{-4}$	0,123	0,055
Овес	480	0,113	$6,56 \cdot 10^{-4}$	0,095	0,036

Горох	700	0,146	$6,73 \cdot 10^{-4}$	0,12	0,053
Квасоля	550	0,124	$6,62 \cdot 10^{-4}$	0,103	0,042
Буряк	720	0,15	$6,75 \cdot 10^{-4}$	0,123	0,055
Кабачок	500	0,116	$6,58 \cdot 10^{-4}$	0,097	0,038
Огірок	660	0,14	$6,7 \cdot 10^{-4}$	0,115	0,05
Цибуля	490	0,115	$6,57 \cdot 10^{-4}$	0,096	0,038
Часник	600	0,131	$6,65 \cdot 10^{-4}$	0,108	0,046

3.4.3. Дослідження відхилення кутової швидкості двигуна при передпосівній обробці насіння в магнітному полі

Навантажувальна діаграма транспортера характеризується змінним режимом роботи. Встановлено, що момент статичних опорів у середньому змінюється за інтервал 1 с у межах від 0,93 до 1,15 Н·м. Для подальшого аналізу реальну навантажувальну діаграму з достатньою точністю апроксимовано ламаною функцією, при цьому на окремих ділянках зміна моменту опорів приймається лінійною.

Зміна навантаження призводить до відповідної динамічної зміни кутової швидкості електродвигуна.

Для оцінювання впливу електромагнітних та електромеханічних перехідних процесів на характер зміни кутової швидкості визначали електромагнітну та електромеханічну сталі часу системи привода.

Електромагнітну сталю часу визначали за залежністю:

$$T_e = \frac{1}{2\pi f s_k}, \quad (3.28)$$

де f – частота струму; s_k – критичне ковзання електродвигуна, $s_k = 0,69$.

Електромагнітна стала часу системи становить 0,0046 с, що свідчить про достатньо швидкі електромагнітні перехідні процеси в контурі привода.

Електромеханічну сталю часу визначали за залежністю:

$$T_m = \frac{J_{zg}}{\beta_0}, \quad (3.29)$$

де β_δ – жорсткість механічної характеристики електродвигуна на робочій ділянці механічної характеристики, $\beta_\delta=0,014 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$.

Оскільки зведений момент інерції електропривода транспортера при зміні ступеня його завантаження варіюється не більше ніж на 2 %, у подальших розрахунках його приймають сталим у процесі передпосівної магнітної обробки насіння.

Числові значення електромеханічної сталої часу для різних видів сільськогосподарських культур, що транспортуються, наведені в табл. 3.2. Встановлено, що електромеханічна стала часу перевищує електромагнітну приблизно у 10 разів, що дозволяє знехтувати впливом електромагнітних перехідних процесів у системі електропривода транспортера та зосередити аналіз на електромеханічній складовій динаміки.

Таблиця 3.2

Зміна кутової швидкості при зміні навантаження

Вид транспортованого матеріалу	Електромеханічна стала часу, с	Кутова швидкість при номінальному навантаженні, с^{-1}	Кутова швидкість при мінімальному навантаженні, с^{-1}	Кутова швидкість при максимальному навантаженні, с^{-1}
Холостий хід	0,0443	154,2	154,2	154,2
Пшениця	0,0484	145,8	147,9	143,7
Жито	0,0481	146,4	148,3	144,4
Ячмінь	0,0475	147,6	149,3	146
Кукурудза	0,0482	146,3	148,2	144,3
Овес	0,0469	148,9	150,2	147,6
Горох	0,0481	146,6	148,4	144,6
Квасоля	0,0473	148,1	149,6	146,6
Буряк	0,0482	146,3	148,2	144,3
Кабачок	0,047	148,7	150,1	147,4
Огірок	0,0479	147,0	148,8	145,2
Цибуля	0,0469	148,8	150,1	147,2
Часник	0,0475	147,6	149,3	146

Отримані приводні характеристики дали можливість виконати аналіз перехідних процесів у електроприводі транспортера.

Встановлено, що при зміні навантаження за лінійним законом у часі асинхронний двигун працює в межах робочої ділянки механічної характеристики, яку з достатньою точністю можна вважати лінійною [37]:

$$M_{\delta} = \beta_{\delta} (\omega_0 - \omega), \quad (3.30)$$

де M_{δ} – момент двигуна; ω_0 – синхронна кутова швидкість; ω – задана кутова швидкість.

Тоді

$$\frac{dM_{\delta}}{dt} = -\beta_{\delta} \frac{d\omega}{dt}, \quad (3.31)$$

звідки

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{1}{\beta_{\delta}} \frac{dM_{\delta}}{dt}. \quad (3.32)$$

Електромеханічний перехідний процес описується рівнянням руху електропривода:

$$M_{\delta} - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (3.33)$$

де M_c – момент статичних опорів робочої машини; J – зведений момент інерції електропривода.

Підставивши вираз (3.32) у рівняння руху електропривода (3.33), отримаємо:

$$M_{\delta} - M_c = -\frac{J}{\beta_{\delta}} \frac{dM_{\delta}}{dt}. \quad (3.34)$$

Рівняння (6.34) можна представити у вигляді:

$$T_m \frac{dM_{\delta}}{dt} + M_{\delta} = M_c, \quad (3.35)$$

де T_m – електромеханічна стала часу.

Перехідний процес у електроприводі транспортера реалізується за умов дії моменту статичних опорів робочої машини, який не залежить від кутової

швидкості, проте змінюється у часі за лінійним законом і може бути описаний відповідним аналітичним рівнянням:

$$M_c = M_{сно} + \gamma t, \quad (3.36)$$

де $M_{сно}$ – момент статичних опорів робочої машини у початковий момент часу; γ – швидкість зміни моменту статичних опорів робочої машини у часі (табл. 3.1)

У такому випадку диференціальне рівняння, що описує зміну моменту електродвигуна, набуває вигляду:

$$T_m \frac{dM_\delta}{dt} + M_\delta = M_{сно} + \gamma t. \quad (3.37)$$

Відносно кутової швидкості диференціальне рівняння має вигляд:

$$T_m \frac{d\omega}{dt} + \omega = \omega_0 - M_c / \beta_\delta = \omega_0 - \frac{M_{сно} + \gamma t}{\beta_\delta}. \quad (3.38)$$

Частинний розв'язок диференціального рівняння (3.35) знаходимо у вигляді

$$M_\delta = a + bt. \quad (3.39)$$

Використовуючи рівняння (6.37), отримаємо:

$$T_m b + a + bt = M_{сно} + \gamma t. \quad (3.40)$$

Звідки частинний розв'язок диференціального рівняння

$$M_\delta = M_{сно} - \gamma T_m + \gamma t = M_{сно} + \gamma(t - T_m). \quad (3.41)$$

Характеристичне рівняння для диференціального рівняння (3.37) має вигляд:

$$T_m k + 1 = 0. \quad (3.42)$$

Тому корінь характеристичного рівняння:

$$k = -1/T_m. \quad (3.43)$$

Загальний розв'язок рівняння (3.37) запишеться у вигляді:

$$M_\delta = M_{сно} + \gamma(t - T_m) + Ae^{-\frac{t}{T_m}}. \quad (3.44)$$

При початкових умовах $t = 0$, $M_\partial = M_{\text{поч}}$ із рівняння (3.44) отримаємо вирази для визначення коефіцієнта A :

$$M_{\text{поч}} = M_{\text{споч}} - \gamma T_{\text{м}} + A, \quad (3.45)$$

Розв'язавши рівняння відносно A , отримаємо розв'язок рівняння (3.37):

$$M_\partial = M_{\text{споч}} + \gamma(t - T_{\text{м}}) + (M_{\text{поч}} - M_{\text{споч}} + \gamma T_{\text{м}})e^{-\frac{t}{T_{\text{м}}}}. \quad (3.46)$$

Якщо початковий режим роботи є усталеним, то рівняння (6.46) прийме вигляд:

$$M_\partial = M_{\text{споч}} + \gamma \left(t - T_{\text{м}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{м}}}} \right) \right). \quad (3.47)$$

Використовуючи рівняння (6.30), можна записати:

$$\beta_\partial (\omega_0 - \omega) = M_{\text{споч}} + \gamma \left(t - T_{\text{м}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{м}}}} \right) \right), \quad (3.48)$$

тоді при усталеному початковому режимі роботи

$$\omega = \omega_0 - \frac{M_{\text{споч}} + \gamma \left(t - T_{\text{м}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{м}}}} \right) \right)}{\beta_\partial}. \quad (3.49)$$

Навантажувальна діаграма електродвигуна транспортера електротехнологічного комплексу для передпосівної обробки насіння в магнітному полі, яка описує зміну моменту двигуна в часі, наведена на рис. 3.10, а крива перехідного процесу зміни кутової швидкості — на рис. 3.11.

Встановлено, що тривалість перехідного процесу в електроприводі транспортера становить приблизно 0,15 с.

За результатами аналізу отриманих даних визначено, що при зміні навантаження відхилення швидкості обертання від оптимального значення не перевищує 3,3 %, що свідчить про стабільну роботу електропривода в межах заданого технологічного режиму.

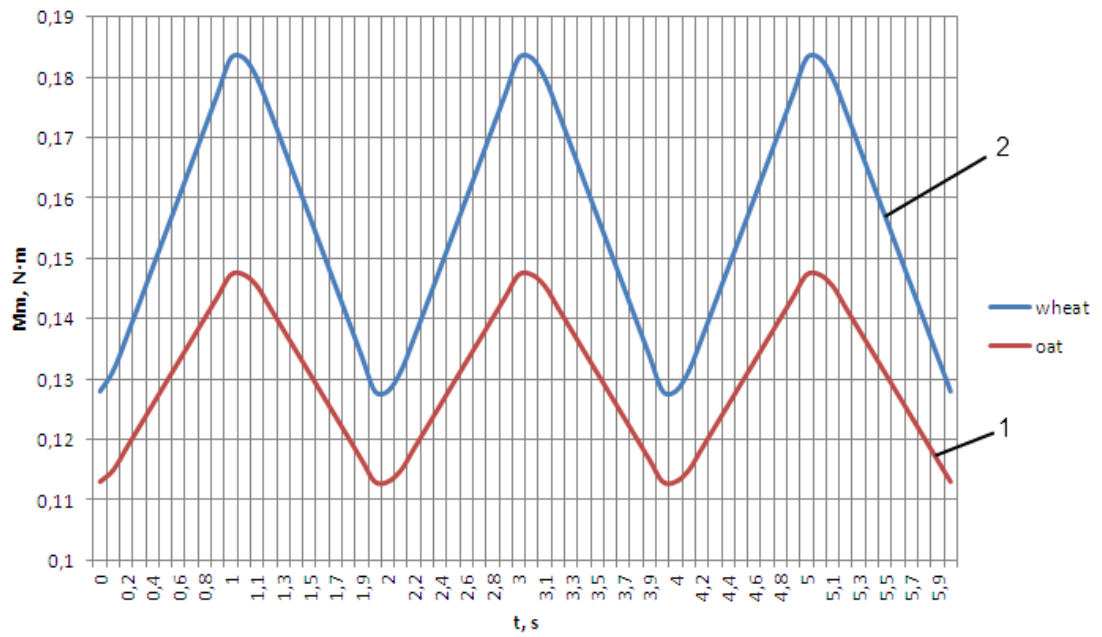


Рис. 3.10. Навантажувальна діаграма електродвигуна електротехнологічного комплексу для передпосівної обробки насіння:
1 – овес; 2- пшениця

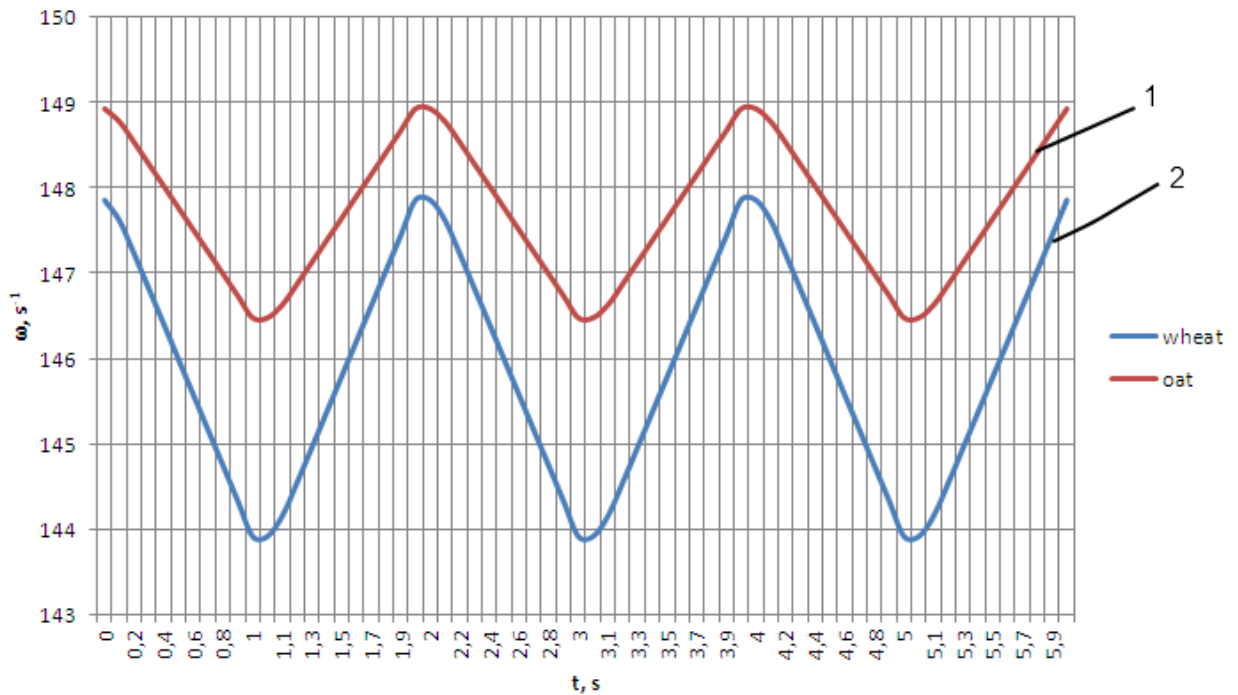


Рис. 3.11. Зміна кутової швидкості у часі електродвигуна транспортера електротехнологічного комплексу для для передпосівної обробки насіння:
1 – овес; 2 – пшениця

Найбільш суттєвий вплив на роботу електроприводів виробничих машин і механізмів мають відхилення напруги живлення та її несиметрія. Аналіз понад 170 експериментальних спостережень показав, що серед показників якості електроенергії, які найчастіше виходять за допустимі межі, домінують відхилення напруги (68 %) та коефіцієнт несиметрії за нульовою послідовністю (38 %).

Встановлено, що, окрім магнітної індукції, на ефективність процесу магнітної обробки насіння істотно впливає швидкість його переміщення в робочій зоні магнітного поля. У свою чергу, швидкість руху насіння визначається режимом роботи привідного двигуна, а також якістю електроживлення, зокрема рівнем відхилення та несиметрії напруги.

Таким чином, асинхронний двигун у таких умовах працює на робочій ділянці механічної характеристики, яка може бути представлена рівнянням:

$$M_m = \beta_m(\omega_0 - \omega), \quad (3.50)$$

де M_m – момент двигуна, Н·м; β_m – жорсткість механічної характеристики двигуна, Н·м·с; ω_0 – синхронна кутова швидкість; ω – задана кутова швидкість; або

$$M_m = \beta_m \omega_0 s, \quad (3.51)$$

де s – ковзання двигуна.

У стрічкового транспортера момент не залежить від кутової швидкості, тому в усталеному режимі роботи

$$M_c = \beta_m \omega_0 s. \quad (3.52)$$

Із виразу (3.52) отримаємо:

$$s = \frac{M_c}{\beta_m \omega_0}. \quad (3.53)$$

При зміні навантаження змінюється момент двигуна (рис. 3.10):

$$M_{cv} = M_{cv*} M_c, \quad (3.54)$$

де M_{cv*} – момент статичних опорів транспортера у відносних одиницях, $M_{cv*} = M_{cv}/M_c$.

Тоді рівняння (3.52) запишеться так:

$$M_{cv*}M_c = \beta_m \omega_0 s_v, \quad (3.55)$$

де s_v – ковзання двигуна при зміні навантаження:

$$s_v = \frac{M_{ccv*}M_c}{\beta_m \omega_0}, \quad (3.56)$$

або з урахуванням (3.53)

$$s_v = M_{cv*}s. \quad (3.57)$$

Тоді зміна ковзання двигуна при зміні навантаження

$$\Delta s = s_v - s = s(M_{cv*} - 1). \quad (3.58)$$

Кутова швидкість двигуна з ковзанням пов'язана залежністю:

$$\omega = \omega_0(1 - s). \quad (3.59)$$

Тоді зміна кутової швидкості двигуна

$$\Delta \omega = \omega_0 \Delta s = \omega_0 s(M_{cv*} - 1) \quad (3.60)$$

Для транспортера прийнято значення $M_{cv*} = 1,14$. Для електродвигуна 5IK40W-GN ковзання становить 13 %, а синхронна кутова швидкість дорівнює 157 с^{-1} . За цих умов зміна кутової швидкості складає $2,05 \text{ с}^{-1}$, що відповідає приблизно 1,5 % від номінального значення.

При зміні напруги живлення електродвигуна рівняння механічної характеристики на робочій ділянці набуває вигляду:

$$M_m = \beta_m U_*^2 (\omega_0 - \omega), \quad (3.61)$$

де $U_* = U/U_n$ – напруга у відносних одиницях.

Тоді для транспортера

$$M_c = \beta_m U_*^2 \omega_0 s_u. \quad (3.62)$$

Ковзання двигуна з урахуванням (3.53)

$$s_u = \frac{M_c}{\beta_m U_*^2 \omega_0} = \frac{s}{U_*^2}. \quad (3.63)$$

Зміна ковзання при відхиленні напруги

$$\Delta s = s_u - s = s(1/U_*^2 - 1), \quad (3.64)$$

а зміна кутової швидкості двигуна

$$\Delta \omega = \omega_0 \Delta s = \omega_0 s(1/U_*^2 - 1), \quad (3.65)$$

У відносних одиницях

$$\omega_* = \frac{\omega_0(1-s_u)}{\omega_0(1-s)} = \frac{1-s/U_*^2}{1-s}. \quad (3.66)$$

Зміна кутової швидкості транспортера при відхиленні напруги показана на рис. 3.12.

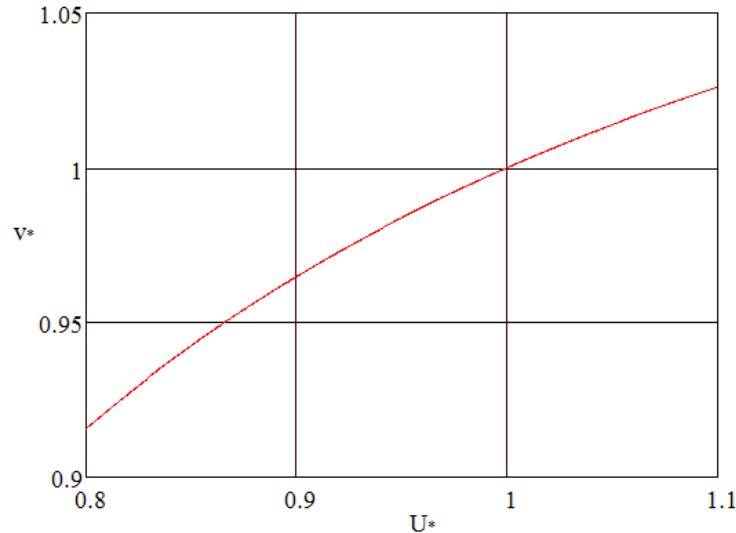


Рис. 3.12. Залежність усталеної швидкості руху транспортера від напруги у відносних одиницях

Оскільки допустиме відхилення напруги становить 5 %, приймаємо відносне значення напруги $U^* = 0,95$. За таких умов відхилення кутової швидкості становить $2,2 \text{ с}^{-1}$, що відповідає приблизно 1,6 % від номінального значення.

У випадку несиметрії напруги живлення механічна характеристика двигуна на робочій ділянці описується рівнянням:

$$M_m = \beta_m \beta_{a*} (\omega_0 - \omega), \quad (3.67)$$

де $\beta_{a*} = \beta_a / \beta_m$ – жорсткість механічної характеристики двигуна при несиметрії напруги у відносних одиницях.

Для транспортера

$$M_c = \beta_m \beta_{a*} \omega_0 s_u. \quad (3.68)$$

Ковзання двигуна з урахуванням (3.53)

$$s_a = \frac{M_c}{\beta_m \beta_{a*} \omega_0} = \frac{s}{\beta_{a*}}. \quad (3.69)$$

Зміна ковзання при несиметрії напруги

$$\Delta s = s_a - s = s(1/\beta_{a^*} - 1), \quad (3.70)$$

а зміна кутової швидкості двигуна

$$\Delta \omega = \omega_0 \Delta s = \omega_0 s(1/\beta_{a^*} - 1). \quad (3.71)$$

У відносних одиницях

$$\omega_* = \frac{1 - s/\beta_{a^*}}{1 - s}. \quad (3.72)$$

На рис. 3.13 показана залежність швидкості руху транспортера від коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною послідовністю.

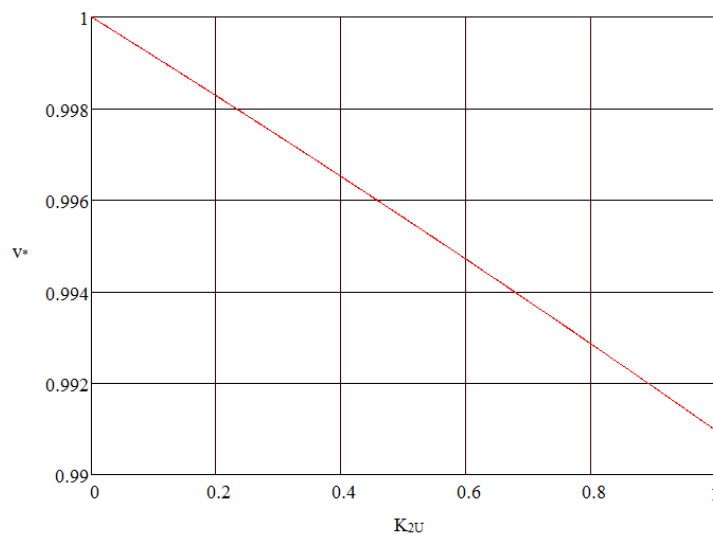


Рис. 3.13. Залежність швидкості транспортера від коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною послідовністю при передпосівній обробці насіння редису в магнітному полі

При коефіцієнті несиметрії напруги за зворотною послідовністю, що становить 0,25, відхилення кутової швидкості дорівнює $0,3 \text{ с}^{-1}$ або близько 0,22 %.

Таким чином, результати проведених досліджень свідчать, що сумарне відхилення кутової швидкості під час процесу передпосівної обробки насіння не перевищує 1,6 %, що підтверджує достатню стабільність роботи електропривода в заданих режимах.

ВИСНОВКИ

1. Нині замість мінеральних добрив для підвищення врожайності сільськогосподарських культур та хімічних засобів засобу рослин почали застосовуватися електрофізичні методи. Магнітна обробка насіння, забезпечуючи підвищення урожайності та якості товарної продукції, порівняно з іншими електрофізичними методами є високопродуктивним, менш затратним, енергозберігаючим та безпечним для обслуговуючого персоналу методом. Найдоцільніше її здійснювати на установках транспортерного типу у знакозмінному магнітному полі, створюваного постійними магнітами, які не потребують спеціальних джерел живлення, додаткових затрат на експлуатацію, забезпечують високу продуктивність і є екологічно безпечними.

2. Проведені експериментальні дослідження зміни під дією магнітного поля енергії проростання, схожості та водопоглинання насіння пшениці, жита, ячменю, вівса, кукурудзи, біометричних показників паростків підтвердили адекватність отриманих аналітичних залежностей та встановлених діючих факторів при магнітній обробці насіння: магнітна індукція та її градієнт, а також швидкість руху насіння у магнітному полі. Ефект обробки насіння залежить від квадрату магнітної індукції та швидкості руху насіння в магнітному полі. Поліусна поділлка є менш суттєвим фактором, оскільки у межах її зміни $0,23 \pm 0,09$ м енергія проростання насіння та схожість змінюються не більше, ніж на 5 %.

Під дією магнітного поля покращуються посівні якості насіння, його водопоглинання та біометричні показники рослин. Найбільші їх значення отримані при магнітній індукції 0,065 Тл, чотирикратному перемагнічуванні, полюсній поділці 0,23 м і швидкості руху насіння 0,4 м/с. За такого режиму обробки енергія проростання насіння збільшувалася порівняно з контролем на 24 – 54 %, а схожість – на 20 – 30 %. При магнітній індукції, що перевищує 0,13 Тл, енергія проростання і схожість насіння змінюється несуттєво, але є більшими порівняно з контролем.

Замочування насіння, обробленого в магнітному полі, у магнітоактивованій воді покращує на 3 – 4 % його посівні якості. Відносно водопоглинання насіння пшениці збільшувалося на 6 %, ячменю – на 11 %.

3. Визначений найефективніший режим обробки насіння зернових культур у магнітному полі був покладений в основу розробки електротехнологічного комплексу, який має транспортер, привод якого здійснюється від електродвигуна потужністю 0,04 кВт, і пристрій для магнітної обробки з 4 парами постійних магнітів на основі NdFeB, встановлених паралельно над і під стрічкою транспортера зі змінною полярністю з полюсною поділкою 0,23 м.

Використовуючи розроблену імітаційну ELCUT-модель, встановлено, що магнітна індукція 0,065 Тл у центрі повітряного зазору забезпечується при використанні 4 пар постійних магнітів марки N38SH з розмірами 400x55x6,3 мм, розміщених на плиті з електротехнічної сталі Ст2211 товщиною 10 мм і повітряному зазорі 90 мм.

Проведені експериментальні дослідження зміни магнітної індукції в повітряному зазорі підтвердили адекватність математичної моделі магнітного поля експериментальним даним. Відхилення магнітної індукції в робочій зоні обробки насіння від оптимального значення 0,065 Тл не перевищує 5%.

4. Завдяки передпосівній обробці насіння у магнітному полі врожайність підвищилася на 17 %. Питома енергоємність процесу передпосівної обробки насіння в магнітному полі становить 0,002 кВт·год/т.

5. На основі отриманих аналітичних виразів, які описують електромеханічний перехідний процес при лінійному законі зміни у часі моменту статичних опорів робочої машини встановлено, що відхилення кутової швидкості двигуна від оптимального значення не перевищує 3,3 %, при зміні транспортованого насіння – 2,3 %, що є допустимим при магнітній обробці насіння. В усталеному режимі роботи швидкість руху стрічки транспортера обернено пропорційна напрузі на статорі електродвигуна.

Перепад швидкості транспортера при допустимому відхиленні напруги 5 % та несиметрії напруги не перевищує 1,6 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ківа О. В., Ходурський В. Є. Дослідження та розробка пристрою для передпосівної обробки насіння цукрового буряка // Вісник Полтавської державної аграрної академії. 2010. № 4. С. 176–178.
2. Pietruszewski S., Martínez E. Magnetic field as a method of improving the quality of sowing material: a review // Agrophysics. 2015. Vol. 29. P. 377–389.
3. Martínez E., Flórez M., Carbonell M. V. Stimulatory effect of the magnetic treatment on the germination of cereal seeds // International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology. 2017. Vol. 2(1). P. 375–381.
4. Amaya J. M., Carbonell M. V., Martínez E., Raya A. Effect of stationary magnetic fields on germination and growth of seeds // Agriculture Revista Agropecuaria. 1996. Vol. 65(773). P. 1049–1054.
5. Kataria S., Baghel L., Kadur N. G. Pre-treatment of seeds with static magnetic field improves germination and early growth characteristics under salt stress in maize and soybean // Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. 2017. Vol. 10. P. 83–90.
6. Maffei M. E. Magnetic field effects on plant growth, development, and evolution // Frontiers in Plant Science. 2014. Vol. 5. P. 445.
7. De Souza A., Sueiro L., García D., Porras E. Extremely low frequency non-uniform magnetic fields improve tomato seed germination and early seedling growth // Seed Science and Technology. 2010. Vol. 38. P. 61–72.
8. Ramalingam R. Seed pretreatment with magnetic field alters storage proteins and lipid profiles in soybean seeds // Plant Physiology and Molecular Biology of Plants. 2018. Vol. 24(2). P. 343–347.
9. Podleśna A., Bojarszczuk J., Podleśny J. Effect of pre-sowing magnetic field treatment on biochemical and physiological processes in faba bean // Journal of Plant Growth Regulation. 2019. Vol. 38. P. 1153–1160.
10. Pietruszewski S. Magnetic biostimulation of spring wheat sowing material. Lublin, 1999.

11. Jabail W. A., Abul-Hail R. Ch., Hussein F. H. Effect of magnetic field on seed germination of *Triticum aestivum* // World Journal of Agricultural Sciences. 2013. Vol. 1(5). P. 168–171.
12. Carbonell M. V. et al. Influencia de campos magnéticos estacionarios en la germinación de semillas de girasol // Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente. 2005. Vol. 2(1). P. 34–39.
13. El-Yozied A. et al. Effect of magnetic field treatment on productivity of tomato plants // Journal of Applied Sciences Research. 2012. Vol. 8(4). P. 2088–2099.
14. Xia L., Guo J. Effect of magnetic field on peroxidase activation // Ying Yong Sheng Tai Xue Bao. 2000. Vol. 11. P. 699–702.
15. Regoli F. et al. Pro-oxidant effects of extremely low frequency electromagnetic fields // Free Radical Biology and Medicine. 2005. Vol. 39. P. 1620–1628.
16. Bhardwaj J. et al. Biochemical changes associated with magnetopriming in cucumber seeds // Plant Physiology and Biochemistry. 2012. Vol. 57. P. 67–73.
17. Shine M., Guruprasad K. Magnetic field exposure effects on maize growth // Acta Physiologiae Plantarum. 2012. Vol. 34. P. 255–265.
18. Payez A. et al. Electromagnetic field effects on wheat seedlings // Electromagnetic Biology and Medicine. 2013. Vol. 32. P. 417–429.
19. Rajabbeigi E. et al. Antioxidant capacity under magnetic field // Electromagnetic Biology and Medicine. 2013. Vol. 32. P. 430–441.
20. Serdyukov Y., Novitskii Y. Impact of weak magnetic field on enzyme activity // Russian Journal of Plant Physiology. 2013. Vol. 60. P. 69–76.
21. Cakmak T., Cakmak Z. Effect of magnetic field on antioxidant systems // Journal of Plant Physiology. 2012. Vol. 169. P. 1066–1073.
22. Domínguez A. et al. Electromagnetic treatment of maize seeds // Agronomía Colombiana. 2011. Vol. 29(2). P. 405–411.

23. Pietruszewski S. Effect of magnetic seed treatment on wheat yield // Seed Science and Technology. 1993. Vol. 21. P. 621–626.
24. Bucur G. Calitățile semincere și recolta grâului de toamnă // Lucrări științifice. 1997. Vol. 5. P. 30–32.
25. Pittman U. I. Effects of magnetic seed treatment on yield of barley, wheat and oats // Canadian Journal of Plant Science. 1977. Vol. 57. P. 37–45.
26. García A. S. et al. Stimulation of germination in soybean seeds // Asian Journal of Agriculture and Biology. 2013. Vol. 1(2). P. 85–90.
27. Souza Torres A. de et al. Effect of magnetic treatment of tomato seeds // Investigaciones Agrarias. 1999. Vol. 14(3). P. 437.
28. Kato R. Effects of magnetic field on growth of Zea mays // Plant and Cell Physiology. 1988. Vol. 7. P. 1215–1219.
29. Clarkson D. T. Ion Transport and Cell Structure in Plants. London: McGraw-Hill, 1974.
30. Baker D. A., Hall J. L. Transport in Plant Cells and Tissues. Essex: Longman, 1988. 592 p.
31. Sinyavsky O., Savchenko V., Dudnyk A. Development and analysis of transport electric drive for seed treatment // IEEE CPEE. 2019. P. 1–6. DOI: 10.1109/CPEE47179.2019.8949145.
32. Donolo P. et al. Effects of negative sequence voltage on induction motors // IEEE ANDESCON. 2016. P. 1–4.
33. Zhang D. et al. Voltage unbalance influence on motor losses // IET Electric Power Applications. 2018. Vol. 12(2). P. 264–270.
34. Neves A. B. F. et al. Voltage unbalance effects on induction motors // ICHQP. 2014. P. 679–683.
35. Pokrovskyi K., Muzychak A. Voltage deviation influence on motor characteristics // Energy Engineering and Control Systems. 2020. Vol. 6(2). P. 104–109.
36. Savchenko V. et al. Influence of electricity quality on agricultural machines // Przegląd Elektrotechniczny. 2021. Vol. 97(8). P. 84–87.

37. Goroshko A., Kashtalian A. Voltage unbalance influence on induction motors // Herald of Khmelnytskyi National University. 2025. Vol. 3(2). P. 110–113.
38. Savchenko V. et al. Voltage deviation influence on transient processes // IEEE MEES. 2021. P. 1–6. DOI: 10.1109/MEES52427.2021.9598660.
39. He D., Pang Y., Lodewijks G. Belt conveyor dynamics // Int. Journal of Civil Engineering. 2016. Vol. 10(7). P. 859–864.
40. Rajković B., Ilić Z., Mijović R. Conveyor transient time analysis // Mining and Metallurgy Institute Bor. 2013. Vol. 109. P. 53–60.
41. Zablodskiy M. et al. Interaction of magnetic field with biological objects // IEEE ELNANO. 2018. P. 261–266.
42. He D., Pang Y., Lodewijks G. Acceleration of belt conveyor systems // Int. Journal of Engineering and Technology. 2016. Vol. 8(3). P. 206–211.
43. Motor-net. AC induction motor. URL: <http://motor-net.com/01-2ik6W.html> (дата звернення: 2026).