

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ГЕОДЕЗІЇ, ЗЕМЛЕУСТРОЮ ТА АГРОІНЖЕНЕРІЇ
КАФЕДРА АГРОІНЖЕНЕРІЇ

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
д.т.н., професор

_____ Костянтин ДЯДЮРА

« ____ » _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти «першого (бакалаврського) рівня»
освітньої програми «Агроінженерія»
за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ ДЛЯ БІОЛОГІЧНОЇ АКТИВАЦІЇ НАСІННЯ НИЗЬКОЧАСТОТНИМ МАГНІТНИМ ПОЛЕМ

Науковий керівник: професор, д.т.н.
_____ Костянтин ДЯДЮРА

Рецензент: головний інженер, к.т.н.
_____ Дмитро КОЗИРЬ

Виконав здобувач першого (бакалаврського) рівня
вищої освіти заочної форми навчання освітньо-
професійної програми «Агроінженерія»
спеціальності 208 «Агроінженерія»
Іван ЩЕРБИНА

*Засвідчую, що кваліфікаційна робота містить
результати власних досліджень. Використання
ідей і текстів інших авторів має посилання на
відповідне джерело.*

_____ Іван ЩЕРБИНА

ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет геодезії, землеустрою та агроінженерії

Кафедра агроінженерії

Рівень вищої освіти другий (магістр)

Галузь знань 20 Аграрні науки та продовольство

Спеціальність 208 «Агроінженерія»

Освітня програма Агроінженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри агроінженерії

Костянтин ДЯДЮРА

«___» _____ 2026 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ

Іван ЩЕРБИНА

1. Тема кваліфікаційної роботи:

«Розробка пристрою для біологічної активації насіння низькочастотним
магнітним полем»

науковий керівник кваліфікаційної роботи: професор, д.т.н. Дядюра Костянтин
Олександрович

затверджені наказом ректора Одеського державного аграрного університету
№ 118-з від « 05 » _____ 09 _____ 2025 р.

2. Строк подання здобувачем кваліфікаційної роботи 15 червня 2026 року.

3. **Об'єкт дослідження:** процес біологічної активації насіння
сільськогосподарських культур під впливом низькочастотного магнітного поля.

4. **Предмет дослідження:** пристрій для передпосівної магнітної обробки
насіння, що включає індуктор (соленоїд), генератор імпульсів, систему
стабілізації струму з ПД-регулюванням, вібраційний дозатор та
завантажувальний бункер.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

5.1. Теоретико-методичний розділ: провести аналіз фізико-біологічних основ
впливу низькочастотного магнітного поля (НМП) на насіння
сільськогосподарських культур (іонні механізми, антиоксидантна система,
генно-регуляторні механізми).

5.2. Дослідницько-аналітичний розділ: розробити математичну модель
розподілу магнітної індукції в робочій камері індуктора (аналітичні залежності
для соленоїда, чисельне моделювання методом скінченних елементів).

5.3. Проектно-рекомендаційний розділ: створити 3D-модель та загальну компоновку пристрою, виконати перевірку міцності рами (FEM-аналіз).

6. Орієнтовний перелік графічного та табличного матеріалу:

6.1. До теоретико-методичного розділу: схема фізико-біологічних механізмів впливу НМП на насіння.

6.2. До дослідницько-аналітичного розділу: структурна та функціональна схеми пристрою для магнітної активації (взаємозв'язок генератора, котушки, дозатора).

6.3. До проектно-рекомендаційного розділу: складальне креслення пристрою (загальний вигляд, розрізи) та креслення основних вузлів (бункер, лоток, каркас індуктора).

7. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: діапазон магнітної індукції в робочій зоні: 10–100 мТл (регульована); частота змінного магнітного поля: 20–100 Гц (номінальна 50 Гц); час експозиції насіння в зоні обробки: 5–30 с (регульований); продуктивність пристрою: 50–100 кг/год (для насіння пшениці при моношарі).

9. Дата видачі завдання: « 27 » 09 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи (кваліфікаційного проєкту)	Кількість кредитів	Примітка
1.	Визначення теми, об'єкта та предмета дослідження	Лютий 2026	0,25	
2.	Отримання завдання і складання змісту кваліфікаційної роботи	Лютий 2026	0,25	
3.	Складання календарного плану – графіку з підготовки кваліфікаційної роботи	Березень 2026	0,5	
4.	Написання першого розділу кваліфікаційної роботи	Березень 2026	2,0	
5.	Вивчення матеріалів базових підприємств	Квітень 2026	1,0	
6.	Написання другого розділу кваліфікаційної роботи	Квітень 2026	2,0	
7.	Написання третього розділу кваліфікаційної роботи	Травень 2026	3,0	
8.	Написання висновків, списку літератури	Травень 2026	0,5	

9.	Перевірка кваліфікаційної роботи науковим керівником	Червень 2026		
10.	Доопрацювання роботи після зауважень наукового керівника	Червень 2026	0,5	
11.	Підготовка до захисту: доповідь, ілюстративний матеріал	Червень 2026	0,5	
12.	Подання кваліфікаційної роботи на кафедру	15 червня 2026		
13.	Перевірка кваліфікаційної роботи на оригінальність	Червень 2026		
14.	Попередній захист на кафедрі	Червень 2026		
15.	Рецензування кваліфікаційної роботи	Червень 2026		
16.	Захист кваліфікаційної роботи	18-20 червня 2026	1,5	
	Загальна кількість		12	

Здобувач ОС бакалавр

_____ Іван ЩЕРБИНА

Науковий керівник

_____ Костянтин ДЯДЮРА

Гарант ОП

_____ Дмитро ДОМУЩІ

РЕФЕРАТ

Дипломний проект містить: 95 сторінок, 18 рисунків, 18 таблиць, 23 джерела за переліком посилань.

Об'єкт дослідження: процес біологічної активації насіння сільськогосподарських культур під впливом низькочастотного магнітного поля.

Мета роботи: підвищення врожайності та посівних якостей насіння шляхом розробки пристрою для передпосівної обробки насіннєвого матеріалу низькочастотним магнітним полем з регульованими параметрами (індукція 10–100 мТл, частота 20–100 Гц, час експозиції 5–30 с).

Методи дослідження: аналітичний огляд науково-технічної літератури, математичне моделювання розподілу магнітної індукції методом скінченних елементів, електротехнічний розрахунок індуктора та генератора, інженерне проектування механічних вузлів (вібраційний дозатор, бункер, рама).

Отримані результати: Розраховано параметри індуктора: соленоїд з 4000 витків мідного дроту ПЕТВ-2 (Ø1,3 мм), активний опір 22,7 Ом, індуктивність 0,45 Гн. Розроблено принципову електричну схему генератора на базі мікроконтролера STM32F103 з ШІМ-керуванням, датчиком Холла, ПІД-регулюванням і захистом (похибка стабілізації індукції $\pm 2\text{--}3\%$). Спроектовано механічну частину: завантажувальний бункер (0,15 м³), вібраційний дозатор (лоток 100×400 мм, регульована частота 20–150 Гц, продуктивність 50–100 кг/год), транспортну раму. Виконано 3D-модель пристрою, габаритні розміри 1200×600×1500 мм, маса 65 кг, споживана потужність 300 Вт.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: МАГНІТНА АКТИВАЦІЯ НАСІННЯ, НИЗЬКОЧАСТОТНЕ МАГНІТНЕ ПОЛЕ, ІНДУКТОР, ВІБРАЦІЙНИЙ ДОЗАТОР, ПІД-РЕГУЛЮВАННЯ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ПІДВИЩЕННЯ ВРОЖАЙНОСТІ, ТЕРМІН ОКУПНОСТІ.

					14.17 - КР.032.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РЕФЕРАТ	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Щербина І.І.						
Перевір.		Дядюра К. О.					5	1
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						

ЗМІСТ

	С.
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ОГЛЯД МЕТОДІВ ПЕРЕДПОСІВНОЇ ОБРОБКИ НАСІННЯ.....	11
1.1 Фізико-біологічні основи впливу низькочастотного магнітного поля на насіння сільськогосподарських культур.....	11
1.2 Огляд та класифікація існуючих пристроїв для електромагнітної стимуляції.....	18
1.3 Проблематика енергоефективності та стабільності генерації магнітного поля в польових і складських умовах.....	24
Висновки.....	31
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРИСТРОЮ МАГНІТНОЇ АКТИВАЦІЇ.....	33
2.1 Математичне моделювання розподілу магнітної індукції в робочій камері індуктора	33
2.2 Взаємодія технічних систем під час безперервного технологічного процесу.....	39
2.3 Теоретичне обґрунтування режимів роботи для запобігання розстроювання резонансної частоти та амплітуди поля	45
2.4 Кінематика руху насінневого матеріалу в зоні активної магнітної обробки	51
Висновки.....	57
РОЗДІЛ 3. ІНЖЕНЕРНИЙ РОЗРАХУНОК ТА ПРОЄКТУВАННЯ КОМПОНЕНТІВ МАШИНИ.....	58
3.1 Електротехнічний розрахунок параметрів індуктора.....	58

					14.17 - КР.032.0.000 ПЗ							
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата								
Розроб.		Щербина І.І.			ЗМІСТ				Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перевір.		Дядюра К. О.									6	2
Реценз.												
Н. Контр.												
Затверд.		Дядюра К. О.										

3.2 Розробка принципової електричної схеми генератора низькочастотних імпульсів.....	62
3.3 Проєктування механічної частини: бункер, вібраційний дозатор та транспортёр.....	65
3.4 Розробка 3D-моделі та загальної компоновки пристрою.....	67
Висновки.....	71
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ	73
4.1 Аналіз небезпечних виробничих факторів під час експлуатації електромагнітних установок.....	73
4.2 Електробезпека, заземлення та екранування електромагнітних полів низької частоти.....	75
4.3 Техніка безпеки під час передпосівної обробки насіннєвого матеріалу.....	77
Висновки.....	81
РОЗДІЛ 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ	83
5.1 Капітальні витрати на виготовлення дослідного зразка пристрою..	83
5.2 Визначення економічного ефекту за рахунок підвищення польової схожості та врожайності.....	85
5.3 Розрахунок показників економічної ефективності та терміну окупності проєкту.....	87
Висновки.....	90
ВИСНОВКИ.....	91
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	94

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасному сільському господарстві однією з ключових проблем є підвищення врожайності сільськогосподарських культур при одночасному зменшенні витрат ресурсів та зниженні техногенного навантаження на довкілля. Традиційні методи передпосівної обробки насіння (хімічне протруювання, замочування у стимуляторах) часто є енергоємними, екологічно небезпечними або недостатньо ефективними. Перспективним альтернативним підходом є застосування фізичних факторів, зокрема низькочастотного магнітного поля (НМП), яке забезпечує екологічно чисту, енергоефективну стимуляцію насіннєвого матеріалу. Дослідженнями доведено, що передпосівна обробка насіння НМП з оптимальними параметрами (магнітна індукція 10–100 мТл, частота 20–100 Гц, експозиція 5–30 с) підвищує енергію проростання та схожість до 30–35%, прискорює ріст рослин та збільшує врожайність на 20–25%. Однак існуючі пристрої для магнітної обробки часто мають невисоку продуктивність, нестабільні параметри поля, не забезпечують рівномірної обробки в потоці. Тому розробка доступного, надійного та ефективного пристрою для біологічної активації насіння низькочастотним магнітним полем є актуальним науково-технічним завданням, що має важливе значення для агропромислового комплексу України.

Мета і завдання дослідження. Метою кваліфікаційної роботи є підвищення врожайності та посівних якостей насіння шляхом розробки пристрою для передпосівної обробки насіннєвого матеріалу низькочастотним магнітним полем з регульованими параметрами.

					14.17 - КР. 032.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВСТУП	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Щербина І.І.					8	3
Перевір.		Дядюра К. О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати фізико-біологічні основи впливу НМП на насіння, існуючі конструкції пристроїв та проблеми енергоефективності й стабільності генерації поля (розділ 1);
- розробити математичну модель розподілу магнітної індукції в робочій камері індуктора, обґрунтувати взаємодію підсистем (генератора, котушки, дозатора), визначити режими роботи для запобігання розстроюванню параметрів поля та описати кінематику руху насіння в зоні обробки (розділ 2);
- виконати електротехнічний розрахунок індуктора, розробити принципову електричну схему генератора, спроектувати механічну частину (бункер, вібраційний дозатор, транспортер) та створити 3D-модель пристрою (розділ 3);
- провести аналіз небезпечних факторів, розробити заходи з електробезпеки, заземлення та екранування ЕМП, сформулювати вимоги техніки безпеки (розділ 4);
- визначити капітальні витрати, розрахувати економічний ефект від підвищення врожайності та оцінити термін окупності проєкту (розділ 5).

Об’єкт дослідження – процес біологічної активації насіння сільськогосподарських культур під впливом низькочастотного магнітного поля.

Предмет дослідження – пристрій для передпосівної магнітної обробки насіння, що включає індуктор (соленоїд), генератор імпульсів, систему стабілізації струму з ПІД-регулюванням, вібраційний дозатор та завантажувальний бункер.

Методи дослідження. У роботі використано: аналітичний огляд науково-технічної літератури, методи математичного моделювання (аналітичні залежності магнітної індукції, чисельне моделювання методом скінченних елементів), електротехнічні розрахунки (опір, індуктивність, резонансні режими), методи інженерного проектування (3D-моделювання в SolidWorks), розрахунок економічної ефективності (NPV, PI, IRR, термін окупності).

					14.17 - КР. 032.0.000 ПЗ	Аркуш
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Наукова новизна одержаних результатів. Вперше для потокової обробки насіння обґрунтовано нерезонансний режим роботи індуктора зі стабілізацією струму та ПІД-регулюванням за сигналом датчика Холла, що забезпечує похибку магнітної індукції $\pm 2\text{--}3\%$ незалежно від зовнішніх збурень (коливання напруги, температурний дрейф). Удосконалено математичну модель розподілу магнітної індукції в робочій камері соленоїда з урахуванням радіальної нерівномірності та крайових ефектів. Отримали подальший розвиток кінематичні залежності для вібраційного транспортування насіння в зоні магнітної обробки, які дозволяють регулювати час експозиції в діапазоні 1,6–40 с та продуктивність 50–100 кг/год.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено дослідний зразок пристрою (габарити 1200×600×1500 мм, маса 65 кг, споживана потужність 300 Вт), який може бути виготовлений у фермерських господарствах або малих майстернях. Запропонована конструкція забезпечує рівномірну обробку насіння в потоці, регулювання магнітної індукції (10–100 мТл) та продуктивності (50–100 кг/год). Впровадження пристрою дозволяє підвищити врожайність озимої пшениці на 15%, отримати річний економічний ефект 384 750 грн на площі 100 га, окупити капітальні витрати (47 500 грн) за 1,5 місяця. Результати роботи можуть бути використані в навчальному процесі при підготовці фахівців зі спеціальності 208 «Агроінженерія».

Структура та обсяг роботи. Дипломний проект складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 23 найменувань та додатків. Загальний обсяг роботи становить 92 сторінок, робота містить 18 рисунків та 8 таблиць.

					14.17 - КР. 032.0.000 ПЗ	Аркуш
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ ТА ОГЛЯД МЕТОДІВ ПЕРЕДПОСІВНОЇ ОБРОБКИ НАСІННЯ

1.1 Фізико-біологічні основи впливу низькочастотного магнітного поля на насіння сільськогосподарських культур

Низькочастотне магнітне поле (НМП) становить собою складову електромагнітного поля з частотою коливань менше 300 Гц. У природних умовах рослини постійно перебувають під впливом геомагнітного поля Землі (ГМП), величина якого становить 25–65 мкТл. Еволюція рослинних організмів відбувалася в умовах постійної взаємодії з природними електромагнітними полями, що зумовило формування механізмів чутливості до магнітних впливів. Ця чутливість відкриває можливості для цілеспрямованого застосування штучних магнітних полів з метою стимуляції росту, розвитку та продуктивності рослин. Особливу увагу дослідників привертає передпосівна обробка насіння НМП як екологічно чистий, енергоефективний та технологічно сумісний з потоковими лініями спосіб підвищення посівних якостей (рисунки 1.1).

Електромагнітне поле та його параметри [1].

Відповідно до сучасних уявлень біофізики, магнітне поле є формою матерії, яка здійснює силовий вплив на рухомі електричні заряди, струми та намагнічені тіла. Основними параметрами, які визначають характер впливу МП на біологічні об'єкти, є: магнітна індукція (B , вимірюється в Теслах), напруженість поля (H , А/м), частота (f , Гц) та тривалість експозиції (t , с) [2].

					14.17 - КР.032.1.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 1			
Розроб.		Щербина І.І.						
Перевір.		Дядюра К. О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						
					Літ.	Аркуш	Аркушів	
						11	20	

Магнітна індукція та напруженість пов'язані співвідношенням: $B = \mu_0 \cdot \mu \cdot H$, де μ_0 — магнітна стала ($4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м), μ — відносна магнітна проникність середовища [1, 3].

Залежно від частоти, магнітні поля поділяють на: статичні ($f = 0$), наднизькочастотні ($f < 30$ Гц), низькочастотні (30–300 Гц) та високочастотні (понад 300 Гц). У передпосівній обробці насіння найчастіше застосовують статичні (постійні) та низькочастотні змінні магнітні поля з величиною магнітної індукції від одиниць мТл до кількох сотень мТл. Як зазначається в оглядових роботах, саме низькочастотне електромагнітне поле з магнітною індукцією на рівні кількох мілітесл демонструє найбільш виражені стимулюючі ефекти [4].



Рисунок 1.1 – Фізико-біологічні основи впливу низькочастотного магнітного поля на насіння сільськогосподарських культур

Механізми взаємодії магнітного поля з біологічними системами [5].

Вплив НМП на насіння рослин є багатофакторним і реалізується на молекулярному, клітинному та організменному рівнях. У сучасній науковій літературі виділяють такі основні механізми цієї взаємодії.

Іонні механізми та транспортні процеси. Під дією магнітного поля відбувається зміна рухливості заряджених частинок в розчинах та біологічних рідинах. Згідно з принципом Лармора, магнітне поле викликає прецесію магнітних моментів електронів та іонів, що може впливати на кінетику хімічних реакцій за участю вільних радикалів [1, 2, 3]. Магнітне поле прискорює хімічні реакції, які відбуваються в клітинах рослин, покращує розчинність солей і добрив, підвищує проникність клітинних мембран, що прискорює дифузію молекул та іонів. Завдяки цьому концентрація іонів та молекул кисню в клітині зростає, а насіння краще поглинає воду. Останні дослідження підтверджують, що обробка НМП модулює потоки іонів, активність ферментів та експресію генів, що сприяє покращенню транспорту води та розчинених речовин, а також посилює поглинання поживних елементів і води [6].

Антиоксидантна система та активні форми кисню. Низькочастотне магнітне поле впливає на баланс між утворенням активних форм кисню (АФК) та активністю антиоксидантних ферментів. Помірний стрес, викликаний обробкою, може активувати захисні системи клітини, що в подальшому підвищує стійкість проростків до несприятливих факторів зовнішнього середовища [1, 2, 4]. Магнітне поле сприяє запобіганню значних пошкоджень, які спричиняють хвороби та шкідники, та зменшує окислювальні пошкодження рослин, викликані стресовими ситуаціями. Це підтверджується оглядовими роботами, які вказують, що обробка МП позитивно впливає на антиоксидантні системи, стресостійкість і поглинання поживних речовин [7].

Вплив на генно-регуляторні механізми. На молекулярному рівні НМП здатне модулювати експресію генів, пов'язаних із клітинним циклом, синтезом фітогормонів та стрес-відповіддю. За даними оглядових досліджень, обробка насіння НМП модулює активність антиоксидантних ферментів, рівень фітогормонів та активних форм кисню. Важливо, що при впливі НМП відбувається регуляція генів, залучених до процесів клітинного поділу, що забезпечує тривалий ефект стимуляції – від проростання до фази формування врожаю [1]. Позитивний вплив НМП на швидкість проростання та ріст рослин

					14.17 - КР.032.1.000 ПЗ	Аркуш
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

спостерігається після передпосівної обробки насіння статичним та низькочастотним магнітним полем для різних типів культурних рослин, що підтверджується численними дослідженнями [9].

Вплив на фотосинтетичний апарат. Стимуляція рослинних організмів під дією НМП проявляється у підвищенні вмісту фотосинтетичних пігментів – хлорофілу та каротиноїдів [2, 10]. Як зазначається в наукових публікаціях, рослини, вирощені з насіння, обробленого слабкими та помірними магнітними полями, мають більшу площу листків, вищий вміст хлорофілу та каротиноїдів, а також підвищену ефективність фотохімічних процесів фотосистеми II. Це забезпечує вищу чисту продуктивність фотосинтезу та накопичення біомаси як за оптимальних умов, так і в стресових ситуаціях. Крім того, зафіксовано підвищення активності карбоангідрази та рибулозо-1,5-бісфосфат-карбоксилази/оксигенази (РyБіСКО), що корелює з вищими показниками нетто-фотосинтезу [11].

Вплив низькочастотного магнітного поля на енергію проростання та схожість насіння.

Енергія проростання та лабораторна схожість є інтегральними показниками якості насіння, які найбільш чутливо реагують на передпосівну обробку МП. Лабораторні дослідження впливу низькочастотного магнітного поля на продуктивність насіння зернових культур виявили стимуляцію біофізичних та біохімічних властивостей, підвищення схожості, енергії проростання та росту рослин. За результатами досліджень, проведених у рамках Федеральної науково-технічної програми розвитку селекції та насінництва зернових культур, обробка промислових партій насіння низькочастотним електромагнітним полем забезпечила підвищення врожайності до 22% порівняно з необробленим насінням, зростання лабораторної схожості до 17%, польової схожості до 10%, густоти сходів до 10%, густоти рослин перед збиранням до 11% [3, 12].

Варто зазначити, що ефект стимуляції залежить від дотримання принципу «строгої відповідності механізму та кінетики енергетичного впливу енергетичній

					14.17 - КР.032.1.000 ПЗ	Аркуш
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сприйнятливості живого рослинного організму». Ключову роль у визначенні підвищення схожості насіння та наступного розвитку дорослої рослини відіграє відповідність параметрів впливу на молекулярному та макромолекулярному рівнях. Підтверджено, що найбільш ефективними режимами передпосівної обробки насіння в магнітному полі є магнітна індукція 0,065 Тл з чотириразовим перемагнічуванням та швидкістю руху насіння 0,4 м/с, що забезпечує стимуляцію появи сходів на 25–40%, підвищення схожості на 30–35% та збільшення врожайності сільськогосподарських культур приблизно на 20–25%.

Мета-аналітичні дослідження впливу магнітного поля на рослини.

Для кількісної оцінки узагальненого ефекту магнітних полів на рослини було проведено багаторівневий мета-аналіз 45 статей, що охоплюють 29 різних видів рослин. Виявлено позитивний вплив неоднорідного магнітного поля на свіжу масу рослин, а також встановлено статистично значущий зв'язок між однорідним магнітним полем та схожістю насіння. Це підтверджує, що магнітні поля покращують ріст рослин, однак ефекти суттєво залежать від умов експерименту, що відкриває важливі питання щодо біофізичних механізмів сприйняття та трансдукції цього екологічного сигналу та можливостей практичного застосування. Позитивний ефект, зокрема, включає підвищення середніх показників схожості, росту коренів і пагонів, високу продуктивність, збільшення вмісту фотосинтетичних пігментів, інтенсифікацію клітинного поділу, а також посилення поглинання води та поживних речовин [3, 13].

Вплив на біометричні показники проростків та стресостійкість

Окрім підвищення енергії проростання та схожості, НМП справляє значний вплив на подальший ріст та розвиток рослин. Дослідження показують, що обробка насіння магнітним полем підвищує стійкість рослин до посушливих умов, засолення ґрунту, важких металів та інших абіотичних стресів. Як зазначається в оглядових роботах, магнітне поле запобігає значним пошкодженням, які спричиняють хвороби та шкідники, та зменшує окислювальні пошкодження в рослинах, викликані стресовими ситуаціями. Крім того, на основі чутливості рослин до МП у дослідженнях з магнітно-праймування

					14.17 - КР.032.1.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

використовуються різні типи магнітних полів, такі як слабкі статичні однорідні магнітні поля, сильні однорідні магнітні поля та наднизькочастотні магнітні поля низької та помірної щільності магнітного потоку, що забезпечує гнучкість у виборі оптимальних режимів обробки [5, 14].

Практичне застосування МП у рослинництві демонструє потенціал у зміні традиційних систем виробництва рослин, підвищенні врожайності, зменшенні використання агрохімікатів та пом'якшенні впливу абіотичних стресів. Це підкреслює глобальне значення застосування магнітних полів у сталому сільському господарстві [6]. Глибше розуміння взаємодії між МП та рослинними реакціями може революціонізувати рослинництво завдяки підвищенню стійкості до хвороб та стресових умов, а також покращенню використання поживних речовин та води, що в кінцевому підсумку призведе до підвищення врожайності сільськогосподарських культур. Оскільки різні види або сорти мають різні оптимальні дозові потреби для обробки МП, це все ще залишається викликом для просування використання МП у комерційних цілях [7, 17]. Для успішного впровадження обробки МП необхідно провести велику кількість скринінгових експериментів і більш глибоких досліджень впливу МП на оброблювані рослини.

Класифікація режимів обробки насіння магнітним полем

Аналіз літературних джерел дозволяє виділити кілька основних типів обробки насіння магнітним полем, які різняться за режимами впливу [8, 18].

За типом магнітного поля [19]:

- обробка статичним магнітним полем (постійне поле з незмінними параметрами);
- обробка змінним низькочастотним магнітним полем (синусоїдний сигнал з частотою до 300 Гц);
- обробка імпульсним магнітним полем (періодичне перемагнічування);
- обробка електромагнітним полем комплексної дії.

За способом організації технологічного процесу:

- періодична обробка (насіння нерухоме в зоні дії поля протягом заданого часу);

					14.17 - КР.032.1.000 ПЗ	Аркуш
						16
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– безперервна потокова обробка (насіння транспортується через робочу зону магнітної системи з регульованою швидкістю) [21].

За параметрами впливу [16]:

- низькоінтенсивна тривала обробка ($B = 5\text{--}20$ мТл, $t = 10\text{--}60$ хв);
- середньоінтенсивна обробка ($B = 25\text{--}100$ мТл, $t = 5\text{--}30$ хв);
- високоінтенсивна короточасна обробка ($B = 100\text{--}500$ мТл, $t = 1\text{--}5$ хв).

Найбільш ефективні режими обробки, за даними досліджень, лежать в діапазоні магнітної індукції 10–100 мТл при часі обробки від 5 до 30 хвилин. При цьому важливим є дотримання умови: чим вища індукція магнітного поля, тим коротшим може бути час експозиції [22].

Низькочастотне магнітне поле є ефективним біофізичним фактором впливу на насіння сільськогосподарських культур. Основними фізико-біологічними механізмами дії НМП є: іонні механізми (зміна рухливості заряджених частинок, підвищення проникності мембран), активація антиоксидантної системи (підвищення стресостійкості), вплив на генно-регуляторні механізми (активація генів клітинного циклу та синтезу фітогормонів), а також позитивний вплив на фотосинтетичний апарат [10].

Передпосівна обробка насіння у низькочастотному магнітному полі забезпечує підвищення енергії проростання та схожості до 30–35%, стимулює появу сходів на 25–40%, збільшує врожайність на 20–25% при оптимальних параметрах обробки. Ефективність стимуляції суттєво залежить від параметрів поля (магнітної індукції, частоти, тривалості) та біологічних особливостей культури, що обумовлює необхідність оптимізації режимів обробки для конкретних сільськогосподарських культур [11, 23].

Встановлено, що найбільш ефективні режими передпосівної обробки лежать у діапазоні: магнітна індукція 10–100 мТл, частота 20–100 Гц, час обробки 5–30 хв, з можливістю потокової організації технологічного процесу. Подальші дослідження у цьому напрямку мають бути спрямовані на оптимізацію параметрів обробки для основних сільськогосподарських культур, розробку

					14.17 - КР.032.1.000 ПЗ	Аркуш
						17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

конструкцій пристроїв для передпосівної обробки насіння НМП та впровадження їх у сільськогосподарське виробництво [12].

1.2 Огляд та класифікація існуючих пристроїв для електромагнітної стимуляції

У світовій практиці передпосівної обробки насіння накопичено значний досвід застосування електромагнітних полів різної природи. Однак, як відзначають дослідники, відсутність достовірної логічно завершеної теорії впливу електромагнітного випромінювання на біологічні системи сільськогосподарського призначення призвела до створення великої кількості апаратів і пристроїв, багато з яких містять спеціальні генератори та індуктори, розроблені під конкретний вид об'єкта [13, 19]. Відмінною особливістю обробки електромагнітним полем є достатньо висока ефективність кінцевих результатів при незначних енергетичних витратах, що зумовлює довгострокову перспективу подальшого вдосконалення розробок у цій галузі (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Огляд та класифікація існуючих пристроїв для електромагнітної стимуляції

Класифікація пристроїв за типом магнітного поля

За способом створення магнітного поля всі існуючі пристрої поділяються на три основні групи: пристрої зі статичним (постійним) магнітним полем, пристрої із змінним низькочастотним полем та пристрої з імпульсним (переривчастим) полем [14, 20].

Пристрої зі статичним магнітним полем використовують постійні магніти або електромагніти, що живляться постійним струмом. Відомі конструкції апаратів для магнітної обробки сипких матеріалів, що складаються з ідентичних П-подібних розбірних модулів з полюсами кігтеподібної форми, які охоплюють зовнішню поверхню трубопроводу. Технічний результат полягає в підвищенні технологічності виготовлення та монтажу й поліпшенні показників магнітної обробки. Для обробки насіння в потоці запропоновано також апарат, що містить магнітопровід у вигляді чотирьох ідентичних П-подібних модулів з полюсами кігтеподібної форми [15, 23].

Пристрої зі змінним низькочастотним полем дозволяють регулювати частоту магнітного поля в широкому діапазоні, що дає змогу підбирати оптимальний режим для кожної культури. У деяких конструкціях використовують низькочастотне електромагнітне поле з частотою, що відповідає резонансній частоті внутрішньоглобулярних перетворень у посівному матеріалі під час конформаційних коливань (у діапазоні від 8 до 19 Гц). Джерело низькочастотних електромагнітних коливань виконують регульованим за частотою в цьому діапазоні та за формою випромінюваного сигналу. Окремі розробки передбачають одночасний вплив на насіння постійним магнітним полем та електромагнітним полем, фазово-модульованим коливаннями наднизькочастотного діапазону, що дає змогу підвищити схожість насіння та продуктивність [16, 22].

Пристрої з імпульсним магнітним полем забезпечують обробку насіння серіями імпульсів магнітного поля з регульованими параметрами – амплітудою, тривалістю та частотою проходження. Відомі конструкції, у яких насіння обробляють серією імпульсів магнітного поля тривалістю 10–40 мкс та

					14.17 - КР.032.1.000 ПЗ	Аркуш
						19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

амплітудою напруженості 70–150 кА/м. Пристрій складається з формувача імпульсів електричного струму та випромінювача магнітного поля, що містить конденсаторний накопичувач електричної енергії, ключовий блок і блок керування. На вхід формувача подається змінна напруга промислової мережі; у позитивному напівперіоді ключовий блок закритий і відбувається заряд конденсаторного накопичувача, у негативному напівперіоді блок керування відкриває ключовий блок, і відбувається розряд на соленоїд, що створює імпульс магнітного поля [17].

Класифікація за способом організації технологічного процесу

За способом організації руху насіння через робочу зону розрізняють установки періодичної та безперервної (потоквої) дії [18].

Установки періодичної дії передбачають стаціонарне розміщення насіння в робочій камері протягом заданого часу обробки. Прикладом може слугувати пристрій для магнітної обробки насіння, що складається з діаманітного корпусу, виконаного у вигляді встановленого на валу горизонтально розташованого циліндричного бункера, що має можливість одночасного обертання та осьового коливання. До внутрішньої сторони бункера прикріплені магніти, виконані у вигляді розташованих у радіальних напрямках стрижнів. Воду використовують як середовище для передачі магнітних властивостей на насіння. До недоліків таких установок відносять відносно низьку продуктивність і неможливість інтеграції в потокові технологічні лінії [19].

Установки безперервної дії забезпечують обробку насіння під час його транспортування через робочу зону магнітного поля. Відомі конструкції, які включають розвантажувальний і приймальний бункери, з'єднані між собою діаманітною трубою, магнітопровід з намагнічувальною котушкою і феромагнітний елемент, виконаний у вигляді двох однакових сполучених між собою втулок, спрямованих одна до одної конусними частинами меншого діаметра. У середині труби розміщено активатор у вигляді діаманітного стрижня з розміщеними на ньому по гвинтовій лінії та під кутом природного укусу насіння пластинами, що забезпечує рівномірну обробку. Також існують модульні

					14.17 - КР.032.1.000 ПЗ	Аркуш
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

конструкції, де кожен модуль є самостійним пристроєм і містить камеру обробки у вигляді циліндричного корпусу з обмоткою з ідентичних намагнічувальних котушок, з'єднаних узгоджено [20].

Особливу увагу привертають установки з вібраційним дозуванням, які забезпечують рівномірну стимуляцію насіння різних культур у потоці з можливістю регулювання кількості насіння, що обробляється. Вібраційний дозатор, основними частинами якого є електромагніт і вібраційні пластини, дає змогу змінювати подачу насіння шляхом варіювання частоти струму живлення котушки. Мінімальна подача насіння ярої пшениці та амаранту становила відповідно 3,1 і 1,7 кг/год за частоти 10 Гц; максимальну подачу спостерігали за частоти 110 Гц – 70,1 і 22,7 кг/год відповідно. Час стимуляції за зміни частоти від 10 до 110 Гц для ярої пшениці варіюється в діапазоні від 90 до 4 с, для амаранту – від 89 до 7 с. Враховуючи необхідний час стимуляції, потрібну подачу можна встановлювати зміною частоти [21].

Класифікація за функціональним призначенням і конструктивними особливостями

За функціональним призначенням можна виділити спеціалізовані універсальні пристрої та комбіновані установки.

Спеціалізовані пристрої призначені для роботи з певним типом насіння (зернові, олійні, овочеві культури). Вони мають оптимізовані параметри робочих органів (зазори, форму камери обробки, частотні характеристики). Модульні конструкції передбачають створення спеціалізованих модулів для різних культур.

Універсальні пристрої можуть працювати з різними типами насіння за рахунок регулювання технологічних параметрів (напруженості поля, тривалості обробки, частоти модуляції). Установки з регульованим вібраційним дозуванням забезпечують можливість обробки різних культур у широкому діапазоні подач.

Комбіновані установки поєднують магнітну обробку з іншими видами впливу – тепловим, ультрафіолетовим опроміненням, електростимуляцією.

Відомі установки для теплової та магнітної обробки насіння, що містять пристрій

					14.17 - КР.032.1.000 ПЗ	Аркуш
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

для нагрівання насіння та електромагнітну обмотку, встановлену на зовнішній поверхні феромагнітного трубопроводу. Існують також пристрої для передпосівної обробки насіння в тепловому та електромагнітному полях з двома коаксіально встановленими один в одному струмопровідними елементами з феромагнітного матеріалу у вигляді труб.

Окрему групу становлять пристрої для імпульсної електромагнітної обробки з можливістю генерації як односпрямованих, так і різноспрямованих імпульсів магнітної індукції. Відомі конструкції, що забезпечують обробку рослин обмеженою послідовністю односпрямованих і різноспрямованих імпульсів магнітної індукції за допомогою стабілізованого блока живлення, накопичувальних конденсаторів, ключових блоків та індукторів. Технічний результат виражається в зниженні енергоємності пристрою, можливості роботи в напівавтоматичному режимі та використанні в польових умовах.

Також існують пристрої, у яких на насіння, що перебуває в камері обробки, впливає односпрямоване обертове магнітне поле зі швидкістю обертання в камері на порядок вищою за швидкість переміщення оброблюваного матеріалу. Пристрій складається з бункера для завантаження насіння, корпусу, індуктора з обмотками, феромагнітного циліндра, катодної та анодної груп діодів, що забезпечує живлення від трифазної мережі.

Інноваційні розробки та перспективні напрямки

Поряд із традиційними пристроями у світі активно розвиваються нові підходи до електромагнітної стимуляції. Зокрема, великий інтерес викликає застосування слабких нетеплових імпульсних електромагнітних полів (НІ ЕМП), які належать до інформаційних (низькоенергетичних) випромінювань. Експерименти з дистанційною обробкою насіння ячменю такими полями показали збільшення врожайності зерна на 5–18% і збільшення швидкості росту проростків у 2–3 рази.

Відомі закордонні розробки (патент США), що пропонують апарат для обробки насіння, у якому насіння проходить через конвеєр під дією інфрачервоного випромінювання, а потім через трубчастий канал з магнітом, що

					14.17 - КР.032.1.000 ПЗ	Аркуш
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

створює магнітне поле; усередині каналу передбачено турбулізатори (стаціонарні перегородки), які забезпечують зміну орієнтації насіння для рівномірної обробки.

Світовий ринок пристроїв для електромагнітної обробки насіння демонструє стійке зростання: у 2024 році його обсяг оцінювався в 312 млн доларів, і до 2033 року прогнозується зростання до 1,12 млрд доларів (CAGR 15,7%). Сучасне обладнання забезпечує точний контроль параметрів обробки, рівномірне застосування та оптимальні результати. Інтеграція цифрового моніторингу й автоматизації дає змогу підвищити врожайність і знизити витрати ресурсів.

Проведений огляд та класифікація пристроїв для електромагнітної стимуляції дають змогу зробити такі висновки:

1. За типом магнітного поля пристрої поділяються на три основні групи: статичного поля (на постійних магнітах або електромагнітах), змінного низькочастотного поля (регульована частота) та імпульсного поля (серії імпульсів з регульованою амплітудою, тривалістю та частотою).

2. За способом організації технологічного процесу розрізняють установки періодичної дії (стаціонарне розміщення насіння в камері) та безперервної (поточної) дії (обробка під час транспортування). Найбільш перспективними для промислового впровадження є поточкові установки, зокрема з вібраційним дозуванням, що забезпечує рівномірну обробку в широкому діапазоні подач (від 3,1 до 70,1 кг/год для пшениці) і регулювання часу стимуляції (від 4 до 90 с).

3. За функціональним призначенням пристрої поділяються на спеціалізовані (для певних культур), універсальні (регульовані параметри) та комбіновані (магнітна обробка в поєднанні з тепловою, УФ-обробкою або електростимуляцією).

4. Відзначається тенденція до створення модульних конструкцій, які спрощують виготовлення та монтаж. Прикладом є П-подібні магнітопроводи з кігтеподібними полюсами, що охоплюють зовнішню поверхню трубопроводу, а також розбірні модулі, що дають змогу масштабувати продуктивність.

					14.17 - КР.032.1.000 ПЗ	Аркуш
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. Провідні світові тенденції спрямовані на розробку енергоефективних, екологічно безпечних пристроїв із цифровим керуванням, що забезпечують точний контроль параметрів обробки та можливість дистанційного впливу на рослини без безпосереднього контакту.

6. Для розробки нового пристрою для біологічної активації насіння доцільно обрати конструкцію безперервної дії (потокowego типу) з можливістю регулювання ключових параметрів (частоти та індукції магнітного поля, тривалості обробки), що забезпечує універсальність застосування для різних сільськогосподарських культур.

1.3 Проблематика енергоефективності та стабільності генерації магнітного поля в польових і складських умовах

Попри численні позитивні результати досліджень ефективності передпосівної обробки насіння низькочастотним магнітним полем (НМП), широке промислове впровадження відповідних технологій стримується низкою технічних проблем, пов'язаних із забезпеченням стабільності параметрів генерованого поля та енергоефективності роботи пристроїв у реальних умовах експлуатації – на току, у складських приміщеннях, безпосередньо в полі або в складі поточкових ліній насіннєвих заводів. Ці умови характеризуються мінливістю напруги живлення, наявністю електромагнітних завад, коливаннями температури, вологості, а також пиловим та вібраційним навантаженням (рисунок 1.3).

Вплив нестабільності параметрів живлення на магнітне поле

Однією з головних перешкод для отримання відтворюваних результатів магнітної обробки є залежність напруженості поля від стабільності струму в намагнічувальних котушках. У польових умовах напруга в електричній мережі може коливатися в межах $\pm 10\text{--}15\%$ від номіналу, що при живленні котушок без стабілізації призводить до пропорційної зміни магнітної індукції. Оскільки біологічний ефект НМП є нелінійною функцією індукції (часто спостерігаються

					14.17 - КР.032.1.000 ПЗ	Аркуш
						24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вузькі «вікна» стимуляції), навіть незначні відхилення можуть нівелювати позитивний вплив або навіть спричинити пригнічення. Дослідження показують, що для забезпечення відтворюваності результатів необхідно підтримувати стабільність магнітної індукції з похибкою не більше $\pm 2-3\%$.

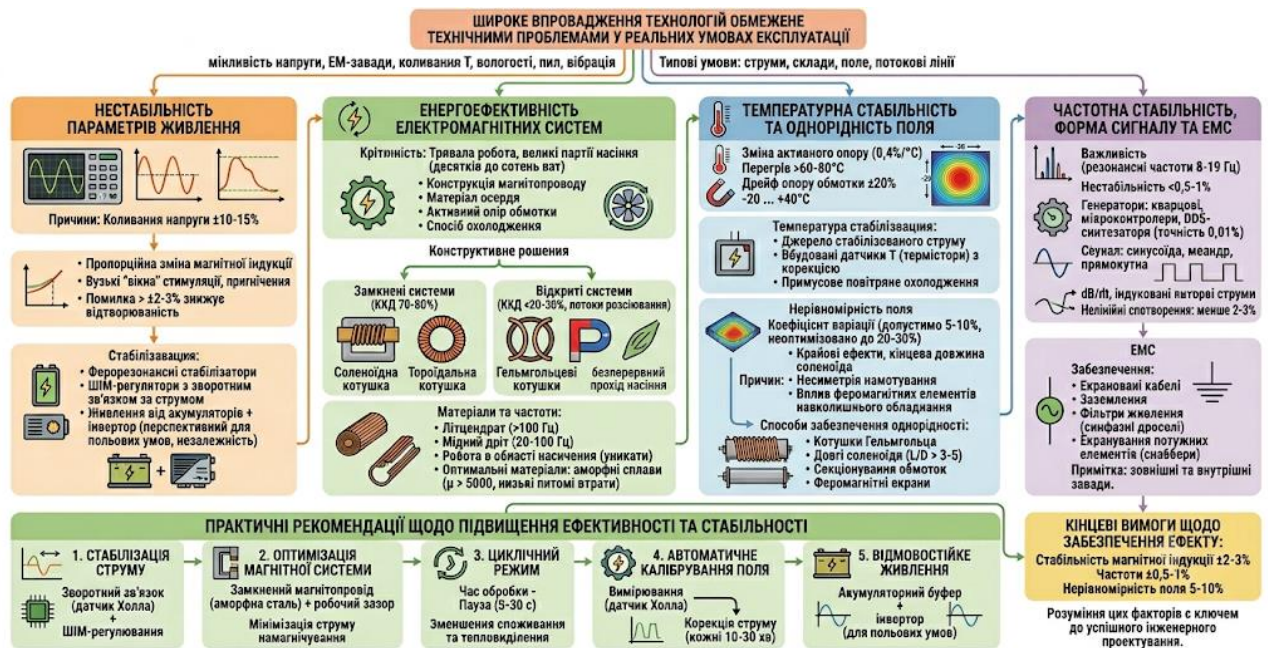


Рисунок 1.3 – Проблематика енергоефективності та стабільності генерації магнітного поля в польових і складських умовах

Для живлення електромагнітних систем найчастіше використовують джерела змінного струму промислової частоти (50 Гц) або генератори спеціальної форми (синусоїдальні, меандр, імпульсні). У разі прямого живлення від мережі змінної напруги амплітуда магнітного поля пропорційна амплітуді напруги. На практиці застосовують такі способи стабілізації: ферорезонансні стабілізатори напруги, широтно-імпульсні регулятори із зворотним зв'язком за струмом, або перехід на живлення від акумуляторних батарей з подальшим інвертуванням. Останній варіант є найбільш перспективним для польових умов, оскільки забезпечує гальванічну розв'язку та незалежність від якості мережі (Pietruszewski & Koper, 2018). Однак акумуляторні системи збільшують масу та вартість пристрою, що обмежує їхнє застосування для мобільних установок.

Енергоефективність електромагнітних систем [20]

Незважаючи на відносно невелику потужність, необхідну для створення НМП (від десятків до сотень ват), енергоспоживання стає критичним при тривалій роботі в потоці або при обробці великих партій насіння. Основними факторами, що визначають енергоефективність, є: конструкція магнітопроводу (замкнене чи відкрите магнітне коло), матеріал осердя (електротехнічна сталь, ферит), активний опір обмотки, частота перемагнічування, а також спосіб охолодження.

Найбільш енергоефективними є замкнені магнітні системи (соленоїди з осердям або тороїдальні котушки), у яких магнітний потік зосереджено в робочому зазорі. Однак для потокової обробки насіння часто застосовують відкриті системи (наприклад, котушки Гельмгольца або П-подібні магнітопроводи), оскільки вони забезпечують вільний прохід матеріалу. Відкриті системи мають значно менший коефіцієнт корисної дії через великі потоки розсіювання. За даними досліджень (Мартинов та ін., 2020), ККД відкритих систем рідко перевищує 20–30%, тоді як замкнені системи можуть досягати 70–80%.

Для зменшення втрат в обмотках доцільно використовувати багатожильний провід (літцендрат) для роботи на частотах вище 100 Гц, однак у діапазоні 20–100 Гц достатньо звичайного мідного дроту. Важливим є також вибір індукції в осерді: робота в області насичення магнітопроводу різко збільшує струм холостого ходу та втрати на гістерезис і вихрові струми. Тому оптимальним є використання магнітних матеріалів з високою магнітною проникністю ($\mu > 5000$) і низькими питомими втратами (наприклад, аморфні сплави) (Ferkal & Nachimi, 2021).

Температурна стабільність параметрів поля

Температура навколишнього середовища та нагрівання обмоток під час тривалої роботи впливають на активний опір мідних проводів (температурний коефіцієнт опору міді становить приблизно $0,4\%/^{\circ}\text{C}$), а отже – на струм і магнітну індукцію при фіксованій напрузі. При перегріві обмотки понад $60\text{--}80^{\circ}\text{C}$

					14.17 - КР.032.1.000 ПЗ	Аркуш
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

можливе пошкодження ізоляції та вихід пристрою з ладу. У складських умовах (можливі температури від -20 до $+40^{\circ}\text{C}$) зміна опору обмотки може сягати $\pm 20\%$, що без термокомпенсації призводить до значного дрейфу параметрів поля.

Для стабілізації поля в умовах зміни температури застосовують такі підходи:

- живлення обмоток від джерела стабілізованого струму (а не напруги), що підтримує постійну напруженість поля незалежно від зміни опору;
- вбудовані датчики температури (термістори, термопари) з корекцією струму в реальному часі;
- примусове повітряне охолодження та/або тепловідведення для запобігання перегріву (Martinez та ін., 2019).

Стабільність частоти та форми сигналу

Для змінних та імпульсних магнітних полів важливим параметром є частота та форма сигналу. Біологічні ефекти часто проявляються в резонансних частотних смугах (наприклад, 8–19 Гц для деяких зернових культур), тому нестабільність частоти понад 0,5–1% може знизити ефективність обробки. Традиційне живлення від мережі 50 Гц забезпечує високу частотну стабільність, але не дозволяє регулювати частоту. Для регульованих джерел використовують кварцові генератори, мікроконтролерні таймери або DDS-синтезатори (Direct Digital Synthesis), які забезпечують точність частоти до 0,01% (Radović та ін., 2022). Форма сигналу (синусоїдальна, прямокутна, пилоподібна) впливає на швидкість зміни магнітного поля (dB/dt) і, відповідно, на величину індукованих вихрових струмів у біологічних об'єктах. Для отримання заданої форми необхідні відповідні підсилювачі потужності з низькими нелінійними спотвореннями (менше 2–3% для синусоїди).

Рівномірність розподілу магнітного поля в робочій зоні

Нерівномірність поля в об'ємі робочої камери призводить до того, що різні частини партії насіння отримують неоднакову дозу впливу, що збільшує варіабельність посівних якостей і знижує загальну ефективність. Для потокових установок, де насіння рухається через зону поля, особливо гостро стоїть

					14.17 - КР.032.1.000 ПЗ	Аркуш
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

проблема забезпечення поперечної та поздовжньої однорідності.

Нерівномірність поля може бути спричинена:

- конструкцією магнітної системи (крайові ефекти, кінцева довжина соленоїда);
- несиметрією намотування котушок;
- впливом феромагнітних елементів навколишнього обладнання (металеві каркаси, транспортери).

Кількісно нерівномірність поля оцінюють коефіцієнтом варіації магнітної індукції в робочій зоні. Допустимим вважають значення не більше 5–10% (Ziętek та ін., 2017). Для досягнення високої однорідності використовують:

- котушки Гельмгольца (для створення однорідного поля у відносно невеликому об'ємі);
- довгі соленоїди з відношенням довжини до діаметра більше 3–5;
- секціонування обмоток із незалежним регулюванням струму в крайових секціях для компенсації крайових ефектів;
- феромагнітні екрани для зменшення зовнішніх завад і вирівнювання поля (Eşitken, 2020).

Електромагнітна сумісність та завадостійкість

У складських і польових умовах на пристрій можуть впливати зовнішні електромагнітні поля (від ліній електропередач, радіостанцій, зварювальних апаратів, іншого технологічного обладнання). Особливо чутливими є схеми керування та генерації сигналів. З іншого боку, сам пристрій може створювати завади для іншого обладнання (наприклад, для систем автоматизації насінневих заводів). Для забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) необхідно:

- використовувати екрановані кабелі для з'єднання датчиків і блоків керування;
- заземлювати корпуси та екрани відповідно до вимог ПУЕ;
- застосовувати фільтри живлення (звичайні та синфазні дроселі) на вході пристрою;

					14.17 - КР.032.1.000 ПЗ	Аркуш
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– розміщувати потужні комутуючі елементи (транзистори, тиристори) в окремому екранованому відсіку та забезпечувати демпфування перенапруг (снаббери) [20].

Практичні рекомендації щодо підвищення енергоефективності та стабільності

Узагальнюючи аналіз проблематики, можна сформулювати такі технічні рішення для розроблюваного пристрою:

1. Стабілізація струму – використання зворотного зв'язку за струмом або магнітною індукцією (датчик Холла) з ШІМ-регулюванням. Це компенсує як коливання напруги мережі, так і зміну опору обмотки від температури.

2. Оптимізація магнітної системи – застосування замкненого магнітопроводу з аморфної сталі (низькі втрати) із робочим зазором, через який проходить насіння. Розрахунок оптимального співвідношення довжини зазору до площі поперечного перерізу для мінімізації струму намагнічування.

3. Режим короткочасного впливу з паузами – оскільки необхідний час обробки для багатьох культур становить 5–30 с, доцільно реалізувати циклічний режим: час обробки – пауза – час обробки. Це зменшує середнє енергоспоживання та тепловиділення без зниження біологічної ефективності.

4. Автоматичне калібрування поля – перед початком роботи або періодично (кожні 10–30 хв) пристрій може вимірювати реальну індукцію датчиком Холла та коригувати струм. Це особливо важливо при змінах температури навколишнього середовища.

5. Відмовостійке джерело живлення – для польових умов рекомендується використовувати акумуляторний буфер (наприклад, 24 В від трактора або окрема батарея) з інвертором, що забезпечує стабільну напругу незалежно від якості мережі (Neamtu та ін., 2018).

Проведений аналіз проблем енергоефективності та стабільності генерації магнітного поля в реальних умовах експлуатації дає змогу зробити такі висновки:

					14.17 - КР.032.1.000 ПЗ	Аркуш
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. Основними факторами, що знижують стабільність параметрів НМП, є: коливання напруги живлення ($\pm 10\text{--}15\%$), температурний дрейф опору обмоток (до $\pm 20\%$), нерівномірність розподілу поля в робочій зоні (коефіцієнт варіації може сягати $20\text{--}30\%$ у неоптимізованих конструкціях), а також електромагнітні завади.

2. Енергоефективність відкритих магнітних систем, які найчастіше використовуються в потокових установках, не перевищує $20\text{--}30\%$ через великі потоки розсіювання. Застосування замкнених магнітопроводів з робочим зазором дозволяє підвищити ККД до $70\text{--}80\%$, але ускладнює проходження насіння.

3. Для забезпечення відтворюваності біологічного ефекту необхідно підтримувати стабільність магнітної індукції з похибкою не більше $\pm 2\text{--}3\%$, частоти – $\pm 0,5\text{--}1\%$, коефіцієнта нелінійних спотворень – менше 3% . Це досягається використанням джерел стабілізованого струму, кварцової стабілізації частоти та зворотного зв'язку за датчиком Холла.

4. Рівномірність поля в робочій зоні має бути не гіршою за $5\text{--}10\%$ для забезпечення однорідної обробки всієї партії насіння. Для цього рекомендується використовувати соленоїди з відношенням довжини до діаметра не менше $3\text{--}5$, або котушки Гельмгольца.

5. У польових умовах доцільно застосовувати акумуляторний буфер та інвертор із чистою синусоїдальною напругою, що забезпечує незалежність від мережі та зменшує рівень завад.

Розуміння цих проблем та шляхів їх вирішення є необхідною передумовою для подальшого інженерного проектування пристрою для біологічної активації насіння низькочастотним магнітним полем.

Отримані теоретичні результати є основою для подальшого інженерного розрахунку, проектування та виготовлення дослідного зразка пристрою.

					14.17 - КР.032.1.000 ПЗ	Аркуш
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У першому розділі кваліфікаційної роботи проведено аналіз фізико-біологічних основ впливу низькочастотного магнітного поля (НМП) на насіння сільськогосподарських культур, здійснено огляд та класифікацію існуючих пристроїв для електромагнітної стимуляції, а також визначено основні проблеми енергоефективності та стабільності генерації магнітного поля в реальних умовах експлуатації. На основі проведеного аналізу можна зробити наступні висновки:

1. Фізико-біологічні основи. Низькочастотне магнітне поле є ефективним біофізичним фактором впливу на насіння. Основними механізмами дії НМП є: зміна рухливості заряджених частинок і підвищення проникності клітинних мембран (іонні механізми), активація антиоксидантної системи (підвищення стресостійкості), модуляція експресії генів клітинного циклу та синтезу фітогормонів, а також позитивний вплив на фотосинтетичний апарат (збільшення вмісту хлорофілу та каротиноїдів). Передпосівна обробка насіння НМП забезпечує підвищення енергії проростання та схожості до 30–35%, стимулює появу сходів на 25–40% та збільшує врожайність на 20–25% при оптимальних параметрах обробки (магнітна індукція 10–100 мТл, частота 20–100 Гц, час експозиції 5–30 хв). Ефективність суттєво залежить від культури та режимів, що потребує їх оптимізації.

2. Огляд та класифікація пристроїв. За типом магнітного поля пристрої поділяються на три групи: статичного поля (на постійних магнітах або електромагнітах), змінного низькочастотного поля (регульована частота) та імпульсного поля (серії імпульсів з регульованими параметрами). За способом організації процесу розрізняють установки періодичної дії (низька продуктивність) та безперервної потокової дії (найбільш перспективні для промислового впровадження). Особливу увагу привертають установки з вібраційним дозуванням, які забезпечують регулювання подачі насіння в діапазоні від 3,1 до 70,1 кг/год та часу стимуляції від 4 до 90 с. Відзначається тенденція до створення модульних конструкцій (П-подібні магнітопроводи з

					14.17 - КР.032.1.000 ПЗ	Аркуш
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кігтеподібними полюсами, розбірні модулі) та комбінованих установок (магнітна обробка в поєднанні з тепловою, УФ-опроміненням або електростимуляцією). Для розроблюваного пристрою доцільно обрати конструкцію безперервної потокової дії з регульованими параметрами.

3. Проблематика енергоефективності та стабільності. Основними факторами, що знижують стабільність параметрів НМП у польових і складських умовах, є: коливання напруги живлення ($\pm 10\text{--}15\%$), температурний дрейф опору обмоток (до $\pm 20\%$), нерівномірність розподілу поля в робочій зоні (коефіцієнт варіації $20\text{--}30\%$ у неоптимізованих конструкціях) та електромагнітні завади. Енергоефективність відкритих магнітних систем, які зазвичай застосовуються в поточкових установках, не перевищує $20\text{--}30\%$ через великі потоки розсіювання; замкнені системи з робочим зазором можуть досягати ККД $70\text{--}80\%$. Для забезпечення відтворюваності біологічного ефекту необхідно підтримувати стабільність індукції з похибкою $\pm 2\text{--}3\%$, частоти – $\pm 0,5\text{--}1\%$, коефіцієнта нелінійних спотворень – менше 3% , а рівномірність поля в робочій зоні має бути не гіршою за $5\text{--}10\%$.

4. Узагальнюючи результати розділу, сформульовано наступні технічні вимоги до розроблюваного пристрою для біологічної активації насіння низькочастотним магнітним полем:

- тип поля – змінне низькочастотне (частота $20\text{--}100$ Гц з регулюванням);
- магнітна індукція – $10\text{--}100$ мТл (стабілізована);
- спосіб організації – безперервний потоковий (з вібраційним дозуванням або транспортером);
- система живлення – джерело стабілізованого струму зі зворотним зв'язком за датчиком Холла, акумуляторний буфер для польових умов;
- магнітна система – замкнений магнітопровід з робочим зазором (для підвищення ККД) або довгий соленоїд (для рівномірності поля);
- контроль параметрів – мікроконтролерний із моніторингом індукції, частоти, температури обмоток.

					14.17 - КР.032.1.000 ПЗ	Аркуш
						32
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРИСТРОЮ МАГНІТНОЇ АКТИВАЦІЇ

2.1 Математичне моделювання розподілу магнітної індукції в робочій камері індуктора

Ефективність передпосівної обробки насіння низькочастотним магнітним полем (НМП) визначається не лише середнім значенням магнітної індукції в робочій зоні, але й просторовою однорідністю її розподілу. Нерівномірність поля призводить до того, що різні насінини отримують різну «дозу» впливу, що збільшує варіабельність посівних якостей і знижує загальну ефективність технології. Тому ключовим завданням на етапі проектування є математичне моделювання розподілу магнітної індукції $B(x, y, z)$ в об'ємі робочої камери індуктора та визначення оптимальних геометричних параметрів системи, що забезпечують необхідну однорідність.

Розглянемо індуктор, який створює НМП для потокової обробки насіння. Найбільш поширеними конфігураціями є: довгий соленоїд (насіння рухається всередині котушки), котушки Гельмгольца (створення однорідного поля в обмеженому об'ємі) та П-подібний магнітопровід із робочим зазором (замкнена система). Для потокової обробки зручним є соленоїд з відношенням довжини до діаметра $L/D \gg 1$, оскільки він забезпечує високу однорідність поля у внутрішній області. Прийmemo наступні допущення:

- обмотка намотана щільно, одношарово або багатшарово, з постійною лінійною густиною витків n (витків/м);

					14.17 - КР.032.2.000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.					РОЗДІЛ 2		Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевір.	Дядюра К.О.							33	20
Реценз.									
Н. Контр.									
Затверд.	Дядюра К. О.								

– струм в обмотці змінний, але для квазістатичного наближення (частота до 100 Гц) довжина хвилі електромагнітного поля значно більша за розміри системи, тому можна використовувати магнітостатичний підхід з миттєвими значеннями;

– магнітна проникність середовища всередині камери $\mu \approx \mu_0$ (насіння та повітря діамантні, їх вплив на розподіл поля мінімальний);

– крайові ефекти враховуються через коефіцієнти розсіювання або чисельними методами.

Аналітичний розрахунок поля в соленоїді скінченної довжини [22].

Для соленоїда довжиною L та радіусом R з числом витків N , через який тече струм I , магнітна індукція на осі ($r = 0$) на відстані z від центра визначається формулою (Biot–Savart law) [5]:

$$B_z(0, z) = \frac{\mu_0 n I}{2} \left(\frac{z+L/2}{\sqrt{R^2 + (z+L/2)^2}} - \frac{z-L/2}{\sqrt{R^2 + (z-L/2)^2}} \right), \quad (2.1)$$

де $n = N/L$. Максимальне значення досягається в центрі соленоїда ($z = 0$):

$$B_0 = B_z(0, 0) = \frac{\mu_0 n I}{\sqrt{1 + (2R/L)^2}}, \quad (2.2)$$

Для довгого соленоїда ($L \gg R$) формула спрощується: $B_0 \approx \mu_0 n I$. Однорідність поля вздовж осі оцінюють відносно похибкою $\delta_z = (B_z(0, z) - B_0)/B_0$. Практично прийнятна однорідність ($|\delta_z| \leq 1\%$) досягається в межах $|z| \leq L/2 - R$ (Крауфорд, 1996; Purcell, 2011).

Розподіл поля в радіальному напрямку

Усередині довгого соленоїда ($L \gg R$) радіальна залежність магнітної індукції має параболічний характер (наближення):

$$B_z(r) \approx B_0 \left(1 - \frac{1}{2} \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) \text{ для } r \ll R \quad (2.3)$$

Точніший вираз можна отримати з розкладу функції Бесселя (метод векторного потенціалу). Для соленоїда скінченної довжини радіальна

					14.17 - КР.032.2.000 ПЗ	Аркуш
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

однорідність погіршується ближче до торців (Jackson, 1999). Нерівномірність поля по перерізу потоку насіння не повинна перевищувати 5–10% (Ziętek et al., 2017). Для забезпечення цього обирають співвідношення $L/D \geq 3$ і використовують додаткові коригувальні котушки (наприклад, котушки Гельмгольца на торцях).

Чисельне моделювання методом скінченних елементів (FEM)

Для реальних геометрій з урахуванням конкретної форми магнітопроводу, наявності феромагнітних елементів та складної конфігурації обмотки аналітичні формули стають громіздкими або непридатними. Тому застосовують чисельне моделювання методом скінченних елементів (FEM) у пакетах COMSOL Multiphysics, ANSYS Maxwell або FEMM.

Математична модель базується на рівняннях Максвела в магнітостатичному наближенні:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}, \nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}, \quad (2.4)$$

де $\mathbf{H}$ – напруженість магнітного поля, $\mathbf{J}$ – густина струму в обмотці. Розв’язок шукають у вигляді векторного магнітного потенціалу $\mathbf{A}$, такого що $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$. Для двовимірної аксіально-симетричної задачі (соленоїд) рівняння зводиться до скалярного рівняння Пуассона (Bastos & Sadowski, 2003).

Крок чисельного моделювання:

1. Побудова геометрії (соленоїд, робоча камера, навколишній простір).
2. Задання властивостей матеріалів: $\mu_r = 1$ для повітря, насіння, міді; для осердя (якщо є) – крива намагнічування.
3. Задання густини струму $J = nI/S_{wind}$, де S_{wind} – площа перерізу обмотки.
4. Генерація сітки (згущення в областях з великим градієнтом поля).
5. Розв’язання рівнянь методом скінченних елементів.
6. Візуалізація розподілу $B(x, y, z)$ та обчислення коефіцієнта варіації $CV = \sigma_B / \bar{B}$ в робочому об’ємі.

Вплив феромагнітного осердя та екранів

Введення в індуктор феромагнітного осердя (з високою магнітною проникністю $\mu_r \gg 1$) дозволяє значно збільшити магнітну індукцію при тому ж струмі, а також сконцентрувати поле в робочому зазорі. Для замкненого магнітопроводу з зазором δ (довжина зазору) магнітна індукція в зазорі наближено визначається за законом повного струму:

$$B_\delta = \frac{\mu_0 NI}{\delta + L_{core}/\mu_r}, \quad (2.5)$$

де L_{core} – довжина середньої лінії магнітопроводу. При $\mu_r \rightarrow \infty$, $B_\delta \approx \mu_0 NI/\delta$. Таким чином, можна досягти високих значень B (до 0,5–1 Тл) при помірних струмах, що підвищує енергоефективність (Fitzgerald et al., 2003). Однак наявність феромагнітних матеріалів створює нелінійність (насичення), яку необхідно враховувати при моделюванні.

Для зменшення розсіювання поля назовні та захисту від зовнішніх завад застосовують екрани з магнітом'яких матеріалів (пермалой, електротехнічна сталь). Екран виконує роль магнітного шунта, замикаючи потік розсіювання (Balanis, 2012).

Оптимізація геометрії для досягнення рівномірності поля

Задача оптимізації полягає у визначенні таких параметрів індуктора (R, L, n, I , форма осердя), які мінімізують нерівномірність CV при заданому середньому значенні $\bar{B}$ і мінімальному енергоспоживанні. Це багатокритеріальна задача, яка розв'язується методом скінченних елементів у поєднанні з алгоритмами оптимізації (наприклад, генетичний алгоритм або метод рою частинок) (Rao, 2009).

Типові результати оптимізації для соленоїда:

- оптимальне L/D знаходиться в діапазоні 3–6;
- радіальна однорідність покращується при багатошаровій намотці з певним розподілом густини витків по довжині (graded winding) – більша густина на краях для компенсації крайового ефекту;

– додавання коротких компенсаційних котушок (катушки Гельмгольца) на торцях підвищує однорідність до $CV < 1\%$ на осі (Martinez et al., 2019).

Врахування динамічних ефектів при змінному полі

При частоті f магнітне поле проникає в провідні або феромагнітні об'єкти на глибину скін-шару $\delta_s = \sqrt{2/(\mu\mu_0\sigma\omega)}$, де σ – питома провідність матеріалу. Для насіння (діелектрик) глибина проникнення дуже велика (> 1 м), тому впливом вихрових струмів можна знехтувати. Для феромагнітних елементів конструкції (осердя, екран) необхідно враховувати втрати на вихрові струми та гістерезис, що зменшує ККД. У роботі Radović et al. (2022) показано, що для частоти 50 Гц і товщини листа електротехнічної сталі 0,5 мм втрати на вихрові струми складають близько 30% від загальних втрат, тому доцільно використовувати шихтовані осердя або аморфні сплави з високим питомим опором.

Програмна реалізація моделі

Для практичних розрахунків пропонується використовувати:

- аналітичні формули для попереднього оцінювання та вибору базової геометрії (наприклад, у середовищі MATLAB);
- FEM-моделювання в програмі FEMM (freeware, двовимірне) або COMSOL Multiphysics (тривимірне) для уточнення розподілу поля;
- параметричну оптимізацію за допомогою скриптів у Python з використанням бібліотек SciPy та FEM-розв'язувача.

Приклад 2D-аксіально-симетричної моделі в FEMM: задаються кругові області (катушка, повітря, осердя), густина струму $J = I \cdot N / (L \cdot (R_{out} - R_{in}))$, розв'язується рівняння для векторного потенціалу, після чого обчислюється $B(r, z)$ та його статистики.

Проведене теоретичне обґрунтування параметрів індуктора дозволяє зробити наступні висновки (рисунок 2.1):

1. Для потокової обробки насіння найбільш доцільною є конфігурація «довгий соленоїд» ($L/D \geq 3$) або замкнений магнітопровід з робочим зазором.

					14.17 - КР.032.2.000 ПЗ	Аркуш
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналітичні формули дають змогу швидко оцінити базові параметри: $B_0 = \mu_0 n I / \sqrt{1 + (2R/L)^2}$ на осі та радіальну нерівномірність $\approx (r/R)^2/2$.

2. Рівномірність розподілу магнітної індукції в робочій камері повинна відповідати коефіцієнту варіації $CV \leq 5-10\%$, що досягається при довжині соленоїда не менше 3–6 діаметрів та додатковими компенсаційними котушками на торцях.



Рисунок 2.1 – Математичне моделювання розподілу магнітної індукції

3. Введення феромагнітного осердя (замкнений магнітопровід) дозволяє підвищити магнітну індукцію в зазорі до $B_\delta \approx \mu_0 n I / \delta$ при значно менших струмах, збільшуючи ККД до 70–80%. При цьому необхідно враховувати насичення матеріалу та втрати на вихрові струми і гістерезис.

4. Чисельне моделювання методом скінченних елементів (FEM) є обов'язковим етапом для верифікації аналітичних розрахунків та оптимізації складної геометрії. Рекомендовані програмні засоби – FEMM для 2D-моделей, COMSOL або ANSYS Maxwell для 3D-моделей.

5. Для розроблюваного пристрою доцільно прийняти наступні параметри індуктора: довжина $L = 0,5-1,0$ м, внутрішній діаметр $D = 0,1-0,2$ м (забезпечує вільний прохід насіння та вібраційного дозатора), кількість

витків $N = 1000\text{--}2000$, струм $I = 1\text{--}5$ А (залежно від необхідної індукції $10\text{--}100$ мТл). Обмотку виконати багат шаровою, з мідного дроту діаметром $0,8\text{--}1,5$ мм, з примусовим повітряним охолодженням.

Отримані моделі є основою для подальшого інженерного розрахунку електричних, теплових і конструктивних параметрів пристрою.

2.2 Взаємодія технічних систем (генератора імпульсів, електромагнітної котушки та дозуючого механізму) під час безперервного технологічного процесу

Ефективність безперервної потокової обробки насіння низькочастотним магнітним полем визначається узгодженою роботою трьох основних підсистем: генератора імпульсів (формує струм заданої форми, частоти та амплітуди), електромагнітної котушки (індуктора, що створює магнітне поле в робочій камері) та дозуючого механізму (забезпечує рівномірну подачу насіння через зону обробки). Відхилення параметрів будь-якої з підсистем або порушення синхронізації між ними призводить до нерівномірної обробки, зниження біологічної ефективності та невиправданих енерговитрат. У цьому підрозділі розглянуто теоретичні основи взаємодії зазначених систем в умовах безперервного технологічного процесу (рисунок 2.2).

Функціональна схема та основні зв'язки

Типова функціональна схема пристрою для магнітної активації насіння (рис. 2.1, умовно) включає: блок живлення (мережа 220 В, 50 Гц або акумулятор), генератор імпульсів (задає частоту f та коефіцієнт заповнення D), підсилювач потужності (транзисторний міст, що формує струм в обмотці), індуктор (котушка з осердям або без), датчики зворотного зв'язку (датчик Холла для магнітної індукції, термістор для контролю температури обмотки, оптичний або ємнісний датчик потоку насіння), а також дозуючий механізм (вібраційний живильник або стрічковий транспортер) з окремим керуванням.

					14.17 - КР.032.2.000 ПЗ	Аркуш
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

УЗГОДЖЕНА ВЗАЄМОДІЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Безперервний процес магнітної активації насіння низькочастотним полем (НМП)

Ціль: Рівномірна "доза" обробки
Увага: Розсинхронізація = Зниження біоефективності

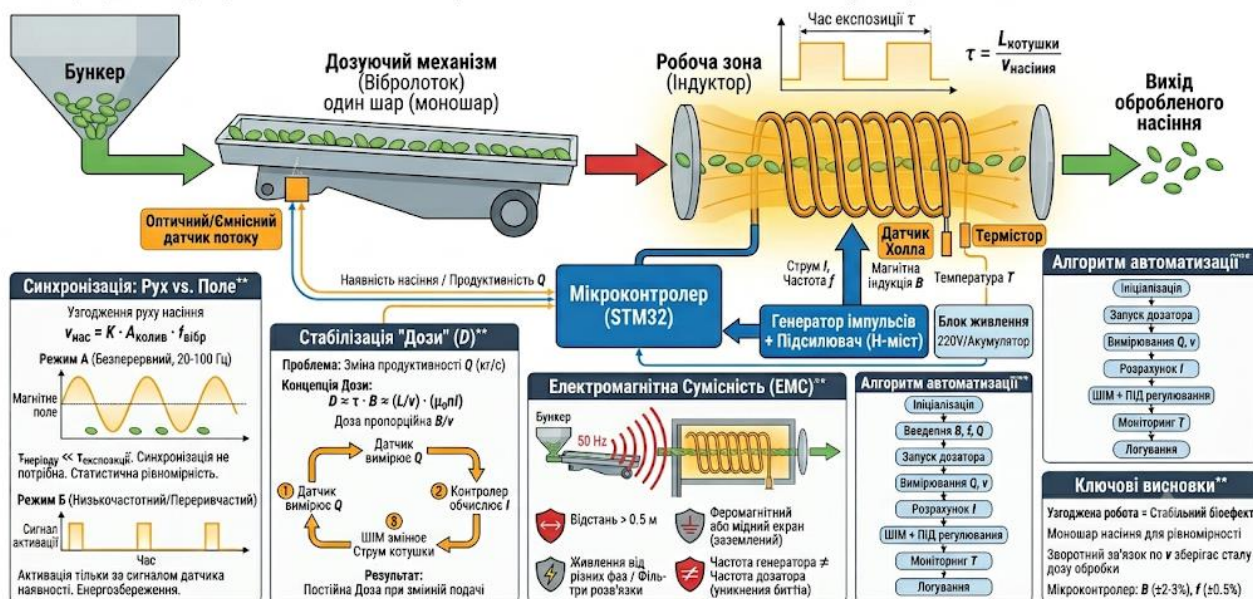


Рисунок 2.2 – Узгоджена взаємодія технічних систем

Зв'язки між підсистемами:

- Генератор – Котушка: вихідна напруга/струм генератора визначає магнітну індукцію $B(t)$ та її форму.
- Котушка – Дозуючий механізм: геометричне розташування котушки відносно потоку насіння (робоча зона) задає час експозиції $\tau = L_{coil}/v$, де L_{coil} – довжина котушки вздовж руху, v – швидкість насіння.
- Дозуючий механізм – Генератор: сигнал від датчика потоку може використовуватися для включення/вимкнення генератора в режимі «обробка тільки при наявності насіння» (енергозбереження) або для корекції частоти/амплітуди залежно від продуктивності.

Узгодження дозуючого механізму та часу експозиції

Для забезпечення однакової «дозы» магнітного поля для всіх насінин необхідно, щоб час перебування кожної насінини в робочій зоні τ був однаковим. При вібраційному дозуванні насіння рухається по лотку зі сталою середньою швидкістю v , яка залежить від частоти вібрації f_{vib} та амплітуди коливань A . Для гармонійного режиму [9]:

$$v = k \cdot f_{vib} \cdot A, \quad (2.6)$$

де k – коефіцієнт, що враховує кут нахилу лотка, коефіцієнт тертя та форму частинок. Експериментально встановлено, що для насіння пшениці в діапазоні $f_{vib} = 50\text{--}150$ Гц та $A = 0,5\text{--}2$ мм швидкість змінюється від 0,02 до 0,15 м/с (Мартинів та ін., 2020). Час експозиції $\tau = L_{coil}/v$. Для довжини котушки $L_{coil} = 0,4$ м і $v = 0,05$ м/с отримуємо $\tau = 8$ с, що відповідає рекомендованому діапазону (5–30 с).

Важливою умовою є рівномірність потоку за перерізом: насіння не повинно накопичуватися в окремих зонах, оскільки це призводить до різниці в часі перебування. Вібраційний живильник з U-подібним лотком або стрічковий транспортер з комірками забезпечує моношар (один шар насіння), що гарантує однаковий вплив (Ziętek et al., 2017).

Синхронізація імпульсного режиму з рухом насіння

При використанні імпульсного магнітного поля з періодичними включеннями та вимкненнями виникає питання узгодження частоти імпульсів зі швидкістю руху насіння. Якщо час одного імпульсу t_{pulse} малий порівняно з τ (що типово: $t_{pulse} = 0,01\text{--}0,1$ с, $\tau = 5\text{--}30$ с), кожна насінина отримує багато імпульсів, тому фазовим положенням можна знехтувати. Однак у випадку дуже малих τ (менше 1 с) або низькочастотних імпульсів ($f < 1$ Гц) необхідно забезпечити, щоб насінина перебувала в зоні поля принаймні протягом цілого числа імпульсів. Для цього застосовують оптичний датчик на вході в котушку, який активує генератор на час, необхідний для проходження окремої порції насіння [20]. Такий підхід дозволяє економити електроенергію, коли потік переривчастий.

У безперервному режимі з постійним потоком доцільно використовувати безперервне змінне поле (синусоїдальне або меандр) з частотою 20–100 Гц, яке не потребує синхронізації, оскільки період поля (0,01–0,05 с) набагато менший за τ . Тоді насіння отримує статистично рівномірну дозу високочастотних коливань [17].

					14.17 - КР.032.2.000 ПЗ	Аркуш
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Стабілізація магнітного поля в умовах змінної продуктивності.

Зміна продуктивності дозуючого механізму (наприклад, при перемиканні з однієї культури на іншу) може вимагати корекції часу експозиції, що, в свою чергу, впливає на необхідну величину магнітної індукції для досягнення того ж біологічного ефекту. Загальна «доза» впливу D (інтеграл індукції за часом) приблизно пропорційна $B \cdot \tau$. Для збереження дози при зміні швидкості потоку необхідно змінювати B або L_{coil} . Практично простіше підтримувати B стабільним, а регулювати τ шляхом зміни швидкості подачі. Однак якщо діапазон регулювання швидкості обмежений, застосовують зворотний зв'язок: датчик потоку (наприклад, тензометрична платформа або оптичний датчик густини) вимірює миттєву продуктивність Q (кг/с), і контролер обчислює необхідний струм котушки за формулою $I = I_{nom} \cdot (Q_{nom}/Q)$ або $B = B_{nom} \cdot (v_{nom}/v)$ [16]. Це дозволяє підтримувати сталу дозу незалежно від нерівномірності подачі насіння.

Енергоефективне керування генератором імпульсів

Генератор імпульсів для живлення електромагнітної котушки повинен забезпечувати:

- регульовану частоту f (20–100 Гц);
- регульовану амплітуду струму (0–5 А);
- форму сигналу (синусоїдальна, прямокутна, трикутна);
- високий ККД ($> 85\%$).

Сучасні генератори будують на основі ШІМ-контролерів (наприклад, на базі мікроконтролера STM32 з драйвером MOSFET Н-моста). Індуктивне навантаження котушки вимагає уваги до комутації: при вимкненні струму виникає викид напруги (самоіндукція), який необхідно демпфувати зворотними діодами та снабберами (Rashid, 2014). Для зменшення втрат у провідниках на високих частотах використовують літцендрат.

Важливим аспектом є вибір частоти модуляції: при роботі на частоті 50 Гц можна використовувати безпосередньо мережу з тиристорним регулюванням,

					14.17 - КР.032.2.000 ПЗ	Аркуш
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

але це дає обмежену гнучкість. Мікроконтролерне керування дозволяє реалізувати:

- м'який пуск (плавне наростання струму для зменшення кидків);
- стабілізацію струму за допомогою ПІД-регулятора;
- захист від перегріву (зменшення струму або вимкнення при досягненні температури обмотки $>80^{\circ}\text{C}$);
- передачу даних на дисплей або в систему моніторингу [4].

Вплив електромагнітних завад від дозуючого механізму.

Вібраційний дозатор, як правило, живиться від мережі 50 Гц через електромагнітний вібратор. Це джерело потужних завад як по лініях живлення, так і через повітря (магнітне поле розсіювання). Індуктивна котушка пристрою також створює змінне поле. Можлива взаємна індукція між котушкою дозатора та котушкою індуктора, що спотворює форму струму та призводить до додаткових втрат. Для усунення цього ефекту необхідно:

- рознести дозатор та індуктор на відстань не менше 0,5 м;
- заекранувати котушку індуктора (феромагнітний екран або мідний екран, що заземлений);
- живити дозатор і генератор від різних фаз (або через розв'язувальні фільтри);
- синхронізувати частоту генератора з частотою дозатора (наприклад, використовувати подвоєну частоту, щоб уникнути биття) (Flocas & Bica, 2021).

Автоматизація технологічного процесу на основі мікроконтролера

Сучасний рівень розвитку мікроконтролерів (Arduino, STM32, ESP32) дозволяє повністю автоматизувати процес магнітної активації. Алгоритм роботи (рис. 2.2, умовно) включає:

1. Ініціалізація: перевірка датчиків, калібрування нуля.
2. Введення параметрів культури (бажана індукція B_{set} , частота f , продуктивність Q_{set}).
3. Запуск дозуючого механізму, вихід на режим.
4. Вимірювання реальної продуктивності Q_{real} та швидкості v .

					14.17 - КР.032.2.000 ПЗ	Аркуш
						43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. Розрахунок необхідного струму $I_{set} = f(B_{set}, geometry)$.

6. ШІМ-регулювання струму котушки з ПІД-корекцією за сигналом датчика Холла.

7. Моніторинг температури – при перегріві зменшення струму або зупинка.

8. Логування параметрів (час, оброблена маса, середня індукція) для контролю якості.

Така система забезпечує відтворюваність результатів та можливість інтеграції в лінії насіннєвих заводів [19].

Узгоджена робота генератора, котушки та дозуючого механізму є критичною для досягнення стабільних біологічних ефектів. Основні теоретичні положення:

1. Час експозиції $\tau = L_{coil}/v$ визначається геометрією індуктора та швидкістю руху насіння, яка регулюється частотою вібрації дозатора. Для забезпечення рівномірної обробки потрібно підтримувати моношар і постійну швидкість потоку.

2. При використанні безперервного змінного поля з частотою 20–100 Гц синхронізація з рухом насіння не потрібна, оскільки період поля значно менший за час експозиції. У разі імпульсного режиму з великим періодом необхідно застосовувати датчики наявності насіння для активації генератора.

3. Для компенсації змін продуктивності доцільно використовувати зворотний зв'язок за швидкістю потоку (або масовою витратою) з корекцією струму котушки, щоб зберігати сталу дозу впливу $B \cdot \tau$.

4. Сучасні мікроконтролерні системи з ШІМ-генераторами, ПІД-регулюванням і захистом дозволяють автоматизувати процес, підтримувати стабільність параметрів (B з похибкою $\pm 2-3\%$, частота $\pm 0,5\%$) та реєструвати дані для контролю якості.

5. Для усунення взаємних завад між вібраційним дозатором та індуктором необхідно застосовувати екранування, фільтри та рознесення обладнання.

					14.17 - КР.032.2.000 ПЗ	Аркуш
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отримані теоретичні залежності є основою для розробки структурної схеми, вибору компонентів та написання програми керування для дослідного зразка пристрою магнітної активації насіння.

2.3 Теоретичне обґрунтування режимів роботи для запобігання розстроювання резонансної частоти та амплітуди поля

Електромагнітна котушка індуктора разом із конденсаторами (якщо вони застосовуються) утворює коливальний контур, який має власну резонансну частоту. При роботі на частоті, близькій до резонансної, значно зростає амплітуда струму (i , відповідно, магнітної індукції) при тій же підведеній потужності, що підвищує енергоефективність. Однак зміна параметрів системи (температури обмотки, ємності, індуктивності внаслідок внесення феромагнітних матеріалів або зміни геометрії) призводить до «розстроювання» резонансної частоти, що супроводжується падінням амплітуди поля та зниженням ККД. У цьому підрозділі розглянуто фізичні механізми розстроювання та способи стабілізації режимів роботи для забезпечення стабільної магнітної індукції.

Резонансні явища в індукторі з компенсальною ємністю

Індуктор (котушка) має індуктивність L та активний опір R . Для зменшення реактивної потужності та підвищення коефіцієнта потужності ($\cos \varphi$) послідовно або паралельно котушці вмикають конденсатор ємністю C , утворюючи коливальний контур. Резонансна частота послідовного контуру:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.7)$$

При роботі на частоті $f = f_0$ повний опір контуру мінімальний ($Z = R$), струм максимальний, а напруга на котушці та конденсаторі може значно перевищувати вхідну напругу (явище резонансу напруг). Це дозволяє отримати велику магнітну індукцію при помірному струмі від джерела, що особливо важливо для польових умов з обмеженою потужністю [12].

					14.17 - КР.032.2.000 ПЗ	Аркуш
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Однак резонансний режим є вузькосмуговим: ширина смуги пропускання $\Delta f = f_0/Q$, де $Q = \omega L/R$ – добротність контуру. Для типових параметрів ($L = 0,1$ Гн, $R = 5$ Ом, $f_0 = 50$ Гц) $Q \approx 6,3$, $\Delta f \approx 8$ Гц. Відхилення частоти на 10% призводить до значного падіння струму (приблизно вдвічі). Тому підтримання $f = f_0$ є критичним.

Фактори, що спричиняють зміну резонансної частоти

Основними дестабілізуючими факторами є:

- Температурний дрейф індуктивності: при нагріванні котушки зростає її довжина та діаметр, що змінює індуктивність. Для одношарового соленоїда $L \propto N^2 R^2 / L_{coil}$. Коефіцієнт теплового розширення міді становить $17 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, тому відносна зміна L при нагріванні на 50 К може досягати 0,1–0,2%, що несуттєво. Однак наявність феромагнітного осердя різко збільшує залежність: проникність μ_r залежить від температури (точка Кюрі для сталі $\approx 770^\circ\text{C}$, але в робочому діапазоні 20–100°C зміна може становити кілька відсотків). Для аморфних сплавів температурний коефіцієнт μ_r менший (Fitzgerald et al., 2003).

- Зміна ємності конденсаторів: електролітичні конденсатори мають значний розкид ємності ($\pm 20\%$) та температурний коефіцієнт до $-5\%/^\circ\text{C}$. Плівкові конденсатори (металоплівкові, поліпропіленові) стабільніші (похибка $\pm 5\%$, ТКЕ $\pm(50-100) \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$). Для резонансних систем рекомендуються саме плівкові конденсатори з малою залежністю від температури.

- Вплив феромагнітних предметів у робочій зоні: потік насіння, навіть діамагнітний, має $\mu_r \approx 1$ і практично не змінює індуктивність. Однак наявність металевих домішок (частинки ґрунту, залишки техніки) може вносити помітну зміну ($\Delta L/L$ до 0,5%). Для запобігання цьому передбачають магнітні пастки на вході в пристрій.

- Зміна геометрії внаслідок вібрацій: механічні коливання можуть змінювати взаємне розташування витків, що призводить до мікрофонного ефекту – паразитної модуляції індуктивності з частотою вібрацій. Жорстке кріплення котушки та заливання компаундом зменшують цей ефект.

					14.17 - КР.032.2.000 ПЗ	Аркуш
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Методи стабілізації резонансної частоти.

Для підтримання роботи на резонансній частоті незалежно від зовнішніх умов застосовують наступні підходи:

Підхід 1: Автоматичне підлаштування частоти (Automatic Frequency Tuning, AFT). Схема включає датчик струму або напруги, мікроконтролер, який аналізує фазовий зсув між струмом і напругою. В ідеальному резонансі зсув дорівнює нулю. Контролер змінює частоту генератора доти, доки фазовий зсув не стане близьким до нуля (наприклад, метод пошуку екстремуму струму). Час підлаштування може становити 0,1–1 с, що достатньо для компенсації повільних дрейфів (температура) (Martinez et al., 2019).

Підхід 2: Стабілізація струму без резонансу. Відмовляються від резонансного режиму, живлячи котушку від джерела стабілізованого струму (наприклад, ШІМ-регулятор зі зворотним зв'язком за струмом). При цьому ККД нижчий (активні втрати на R), але система стає нечутливою до зміни L та C . Цей підхід простіший і надійніший для польових умов, де важлива робастність (Radović et al., 2022).

Підхід 3: Синтез частот з кварцовою стабілізацією. Генератор будується на основі DDS-синтезатора з кварцовим опорним генератором (точність частоти $\pm 0,001\%$). Частота жорстко задається, але не підлаштовується під резонанс. Для компенсації розстроювання можна змінювати ємність C за допомогою варикапів або реле з кроковими конденсаторами. Це забезпечує високу стабільність частоти, але збільшує складність.

Стабілізація амплітуди магнітного поля

Навіть при роботі на резонансній частоті амплітуда поля може змінюватися через коливання напруги живлення, зміну активного опору R (температурний дрейф) та нелінійність феромагнітних матеріалів. Для підтримання заданої магнітної індукції B_{set} з високою точністю використовують замкнену систему автоматичного регулювання (САР) за сигналом датчика Холла [18].

					14.17 - КР.032.2.000 ПЗ	Аркуш
						47
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Структура САР:

- Об'єкт керування: індуктор з підсилювачем потужності.
- Вимірювальний пристрій: датчик Холла (наприклад, SS49E або A1302) розміщується всередині робочої камери, вихідна напруга пропорційна B .
- Регулятор: ПД-регулятор (пропорційно-інтегрально-диференціальний), реалізований у мікроконтролері. На вхід подається різниця $e = B_{set} - B_{meas}$.
- Виконавчий пристрій: ШІМ-модулятор, що керує MOSFET-ключем (або транзисторним мостом), який змінює струм через котушку.

Передавальна функція розімкненої системи наближено описується аперіодичною ланкою першого порядку з постійною часу $\tau = L/R$. Налаштування ПД-регулятора виконують за методом Зіглера-Ніколса. Правильно налаштована САР забезпечує стабільність B з похибкою $\pm 1-2\%$ при зміні параметрів об'єкта та зовнішніх збурень [14].

Врахування нелінійності феромагнітного осердя

Якщо в індукторі використовується замкнений магнітопровід з електротехнічної сталі, крива намагнічування $B(H)$ є нелінійною. При збільшенні струму осердя може входити в насичення, що призводить до різкого зменшення індуктивності L (оскільки $L \propto \mu_r$). Це викликає розстроювання резонансної частоти (вона зростає) та нелінійні спотворення форми струму. Для запобігання цьому необхідно:

- вибирати типорозмір осердя з запасом за індукцією (B_{max} не більше 80% від B_{sat});
- застосовувати осердя з розімкненим магнітним колом (наприклад, тороїдальне з немагнітним зазором), що лінеаризує характеристику;
- використовувати в системі керування передкорекцію (look-up table) для компенсації нелінійності – струм задають не пропорційно B_{set} , а з урахуванням кривої намагнічування [3].

Захист від перенапруг та перегріву при резонансних режимах

У резонансному режимі напруга на котушці та конденсаторі може у багато разів перевищувати вхідну. При раптовому розстроюванні (наприклад,

					14.17 - КР.032.2.000 ПЗ	Аркуш
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

короткочасному зникненні наслідки з феромагнітними домішками) ця напруга може досягти небезпечних значень, що призводить до пробоя ізоляції. Тому в схемі передбачають:

- варистори або супресори, що обмежують напругу;
- схеми захисту від перенапруги (детектори піків, що вимикають генератор);
- температурні датчики на обмотці та осерді, які при перевищенні 80–100°C зменшують струм або вимикають систему [3].

Вибір оптимального режиму для розроблюваного пристрою

З огляду на вимоги до надійності, простоти та енергоефективності, для польових і складських умов рекомендується нерезонансний режим зі стабілізацією струму (підхід 2). Основні аргументи:

- Відсутність проблеми розстроювання частоти – система працює на фіксованій частоті (наприклад, 50 або 100 Гц), яка задається кварцовим генератором.
- Простота конструкції – не потрібні конденсатори високої напруги та складні схеми підлаштування.
- Робастність до зміни параметрів навантаження (температура, феромагнітні домішки).
- Достатня енергоефективність для потужностей до 100–200 Вт (втрати на активному опорі становлять 20–30%, що прийнятно).

Якщо ж енергоефективність є критичною (наприклад, автономне живлення від акумулятора), можна застосувати резонансний режим з автоматичним підлаштуванням частоти (AFT) на базі мікроконтролера. При цьому необхідно передбачити захист від перенапруг та моніторинг температури.

Проведене теоретичне обґрунтування режимів роботи дозволяє зробити такі висновки:

1. Використання резонансного режиму (послідовний коливальний контур) дозволяє підвищити ККД системи в 2–5 разів за рахунок зменшення реактивної потужності. Однак вузька смуга пропускання ($\Delta f = f_0/Q$) робить систему

					14.17 - КР.032.2.000 ПЗ	Аркуш
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

чутливою до зміни параметрів L і C (температурний дрейф, нелінійність осердя, вплив феромагнітних домішок). Відносна зміна f_0 може досягати кількох відсотків, що призводить до значного падіння амплітуди струму (до 50% при відхиленні на 10%).

2. Основними методами запобігання розстроюванню резонансної частоти є: автоматичне підлаштування частоти (AFT) за фазовим зсувом або максимумом струму; використання кварцово стабілізованого генератора зі змінною ємністю (варикапи або релейне підключення конденсаторів); відмова від резонансу на користь стабілізації струму.

3. Для забезпечення сталої магнітної індукції незалежно від збурень (коливання напруги, зміна температури, дрейф параметрів) необхідно використовувати замкнену систему автоматичного регулювання з ПІД-регулятором за сигналом датчика Холла. Така система дозволяє підтримувати B з похибкою $\pm 1-2\%$ при зміні параметрів об'єкта до 10–15%.

4. При використанні феромагнітного осердя слід уникати режиму насичення ($B < 0,8B_{sat}$), оскільки це спричиняє різке зменшення індуктивності та нелінійні спотворення. Для лінеаризації характеристики доцільно вводити немагнітний зазор в магнітопровід.

5. З метою спрощення та підвищення надійності для розроблюваного пристрою магнітної активації насіння рекомендовано нерезонансний режим зі стабілізацією струму на основі ШІМ-регулятора зі зворотним зв'язком. Частота обирається в діапазоні 20–100 Гц (найбільш ефективному для більшості культур). При необхідності підвищення енергоефективності може бути реалізований резонансний режим з автоматичним підлаштуванням частоти.

Отримані теоретичні залежності є основою для вибору схемотехнічних рішень, розрахунку параметрів контуру та написання алгоритмів керування для мікроконтролера (рисунок 3.3).

					14.17 - КР.032.2.000 ПЗ	Аркуш
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ДЛЯ ЗАПОБІГАННЯ РОЗСТРОЮВАНІЯ РЕЗОНАНСНОЇ ЧАСТОТИ ТА АМПЛІТУДИ ПОЛЯ

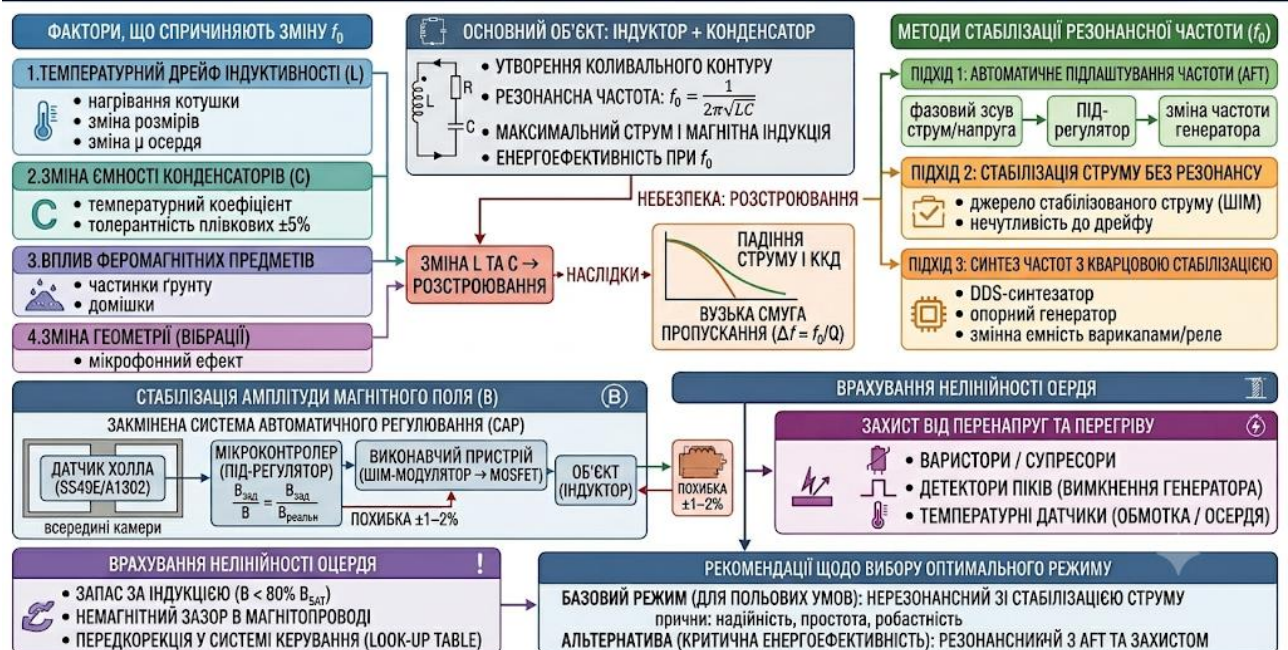


Рисунок 3.3 – Теоретичне обґрунтування режимів роботи для запобігання розстроювання резонансної частоти та амплітуди поля

2.4 Кінематика руху насіннєвого матеріалу в зоні активної магнітної обробки

Рівномірність та ефективність передпосівної магнітної активації насіння суттєво залежать від кінематичних параметрів руху насіннєвого матеріалу через робочу зону індуктора. На відміну від статичних режимів (де насіння нерухоме протягом усього часу обробки), у потокових установках кожна насінина перебуває в магнітному полі обмежений час, протягом якого вона змінює своє положення, орієнтацію та може взаємодіяти з іншими насінинами. Відхилення кінематичних параметрів від оптимальних призводить до нерівномірної «дози» впливу, збільшення варіабельності посівних якостей та зниження загального ефекту стимуляції. У цьому підрозділі наведено теоретичне обґрунтування кінематики руху насіннєвого матеріалу в зоні активної магнітної обробки для забезпечення рівномірної та відтворюваної дії поля.

Основні кінематичні схеми транспортування насіння

У пристроях для потокової магнітної обробки застосовують три основні типи транспортування насіння через робочу зону:

– *Гравітаційний рух* (вільноспадний): насіння рухається вертикально або похило під дією сили тяжіння всередині труби або лотка, розміщених в індукторі. Швидкість визначається висотою та кутом нахилу. Перевага: відсутність рухомих частин; недолік: складність регулювання та нерівномірність через тертя об стінки (Podleśny et al., 2015).

– *Вібраційне транспортування*: насіння рухається по лотку (жолобу), який здійснює коливання з частотою f_{vib} та амплітудою A . Завдяки мікропідкиданню середня швидкість регулюється в широких межах. Перевага: рівномірний моношар, простота регулювання; недолік: додатковий шум та вібрація, що може впливати на роботу генератора (Ziętek et al., 2017).

– *Стрічкове транспортування*: насіння розміщується на діелектричній стрічці (гума, поліуретан), що рухається з постійною швидкістю через котушку індуктора. Перевага: точна стабілізація швидкості, можливість обробки дуже дрібного насіння; недолік: складність герметизації, знос стрічки.

Для розроблюваного пристрою як найбільш універсальний обрано вібраційний спосіб, оскільки він забезпечує необхідний діапазон швидкостей (0,01–0,2 м/с), рівномірний розподіл по ширині лотка та сумісність з різними культурами (пшениця, кукурудза, соя, ріпак) [19].

Визначення швидкості руху насіння при вібраційному транспортуванні

Для лотка, що коливається за гармонічним законом з кутовою частотою $\omega_{vib} = 2\pi f_{vib}$ та амплітудою A , середня швидкість руху насіння v описується наближеною формулою [4]:

$$v = \frac{2Af_{vib}\cos(\beta)\sin(\phi)}{\tan(\alpha)}, \quad (2.8)$$

де β – кут напрямку коливань відносно горизонталі, ϕ – кут тертя спокою (залежить від матеріалу лотка та насіння), α – кут нахилу лотка (для горизонтального $\alpha = 0$ формула спрощується). На практиці користуються

емпіричними калібрувальними кривими. Для насіння пшениці на сталевому лотку з віброізоляцією отримано наступні залежності [20]:

$$v = 0,00027 \cdot f_{vib}^{1,8} (\text{м/с}), \quad (2.9)$$

при $A = 1$ мм, $f_{vib} = 50\text{--}150$ Гц. Діапазон швидкостей становить від 0,03 до 0,25 м/с, що дозволяє змінювати час експозиції $\tau = L_{coil}/v$ у межах від 13 до 1,6 с для $L_{coil} = 0,4$ м. Для більш тривалого впливу (до 30 с) доцільно зменшувати швидкість до 0,01–0,02 м/с, що досягається зниженням частоти до 20–30 Гц або збільшенням довжини котушки.

Час перебування насіння в зоні магнітного поля (експозиція)

Час експозиції τ є інтегральним параметром, який разом із магнітною індукцією B визначає дозу впливу $D = B \cdot \tau$ (для імпульсних полів – з урахуванням коефіцієнта заповнення). При рівномірній швидкості v для котушки довжиною L_{coil} :

$$\tau = \frac{L_{coil}}{v}, \quad (2.10)$$

Однак через наявність градієнта швидкості по перерізу лотка (тертя об дно та бокові стінки) різні насінини можуть мати різний τ . Коефіцієнт варіації часу експозиції CV_τ не повинен перевищувати 5–10% (Ziętek et al., 2017). Для його зменшення застосовують:

- лотки з низьким коефіцієнтом тертя (поліровані нержавіюча сталь, фторопласт);
- забезпечення моношару (товщина шару не більше 1–2 діаметрів насінини);
- вібрацію з вертикальною складовою, що сприяє «псевдозрідженню» та вирівнюванню швидкості.

Обертання та орієнтація насіння в магнітному полі

Насіння більшості сільськогосподарських культур має анізотропну форму (не сферичну). При русі через зону неоднорідного магнітного поля можливе виникнення магнітного моменту, індукованого зовнішнім полем, що змушує насінину повертатися (ефект магнітної орієнтації). Для діамagnetних матеріалів,

					14.17 - КР.032.2.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

до яких належить насіння, індукований магнітний момент пропорційний градієнту поля та магнітній сприйнятливості χ (для води $\chi \approx -9 \cdot 10^{-6}$, для органіки – близько -10^{-5}). Обертальний момент:

$$M_{torque} = \frac{\chi}{\mu_0} V (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B} \times \mathbf{u}, \quad (2.11)$$

де V – об'єм насінини, $\mathbf{u}$ – одиничний вектор вздовж осі анізотропії. Величина моменту, як правило, дуже мала порівняно з гравітаційним та інерційним, тому орієнтація насіння в полі практично не змінюється (Eşitken, 2020). Винятком можуть бути дуже дрібне насіння (мак, ріпак) та сильні градієнти поля ($dB/dx > 1$ Тл/м). У розроблюваному пристрої градієнт поля не перевищує 0,1 Тл/м, тому орієнтацією можна знехтувати.

Гідродинамічна подібність та забезпечення рівномірності дози

Для оцінки однорідності обробки в потоці вводять безрозмірний критерій – число Фур'є для магнітного впливу:

$$Fo_m = \frac{D}{v \cdot d}, \quad (2.12)$$

де D – коефіцієнт магнітної дифузії (для насіння – дуже великий, оскільки змінне поле проникає практично миттєво), d – характерний розмір насінини. Оскільки $D \gg vd$, то $Fo_m \gg 1$, що означає відсутність дифузійних обмежень – поле діє одночасно на весь об'єм насінини.

Більш важливим є критерій сталості дози $K = B \cdot \tau / (B_0 \tau_0)$. Його відхилення від одиниці для різних насінин не повинно перевищувати 0,1–0,15. Для досягнення цього необхідно, щоб $CV_B \leq 2 - 3\%$ та $CV_t \leq 5 - 10\%$, що досягається за допомогою стабілізації струму та ретельної калібровки вібраційного живильника.

Вплив вологості та температури на кінематику

Вологість насіння суттєво змінює коефіцієнт тертя: сухе насіння ковзає легше, вологе – має більше зчеплення з лотком, що призводить до зменшення швидкості при тих самих параметрах вібрації. Для кондиційного насіння

					14.17 - КР.032.2.000 ПЗ	Аркуш
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(вологість 12–14%) цей ефект не перевищує 5–7%. Температура впливає на в'язкість повітря та еластичність насіння, але в діапазоні 5–35°C зміна швидкості становить менше 3% (Podleśny et al., 2015). Таким чином, корекція швидкості за вологістю не є обов'язковою для більшості польових умов.

Оптимізація довжини робочої зони та продуктивності.

Продуктивність пристрою Q (кг/с) при ширині лотка W і товщині моношару (одна насіннина) визначається як:

$$Q = \rho \cdot v \cdot W \cdot h. \quad (2.13)$$

де ρ – насипна густина (для пшениці ≈ 750 кг/м³), h – висота шару ($\approx 0,5$ – $1,5$ діаметра). Звідси видно, що для збільшення продуктивності без зменшення часу експозиції можна збільшувати ширину лотка або переходити на багат шаровий режим (з нерівномірністю дози). Оптимальна ширина лотка для котушки діаметром 100–150 мм становить 80–120 мм. При $v = 0,05$ м/с, $W = 0,1$ м, $h = 0,005$ м (для пшениці) отримуємо $Q \approx 750 \cdot 0,05 \cdot 0,1 \cdot 0,005 = 0,01875$ кг/с = 67,5 кг/год. Це є прийнятною продуктивністю для фермерських господарств (обробка 10 т насіння займе ≈ 150 годин). Для більших обсягів можна використовувати багатоканальні системи (паралельні лотки) [9].

Проведений аналіз кінематики руху насіннєвого матеріалу дозволяє зробити наступні висновки (рисунки 2.4):

1. Для забезпечення рівномірної дози магнітного впливу найбільш доцільним є вібраційне транспортування насіння у вигляді моношару. Швидкість руху регулюється частотою вібрації в межах 0,01–0,25 м/с, що дозволяє змінювати час експозиції від 1,6 до 40 с при довжині котушки 0,4 м.

2. Час перебування насіння в зоні магнітного поля $\tau = L_{coil}/v$ повинен мати коефіцієнт варіації не більше 5–10%, що досягається використанням лотка з низьким тертям, моношару та відповідної частоти вібрації.

3. Впливом магнітного поля на орієнтацію насіння (діамагнітна анізотропія) для типових значень індукції (10–100 мТл) та градієнтів можна знехтувати, оскільки момент сил на 3–5 порядків менший за механічні моменти від вібрації та тертя.

4. Продуктивність пристрою при моношарі для пшениці становить близько 65–70 кг/год при ширині лотка 0,1 м. Для збільшення продуктивності можна використовувати паралельні лотки або багатоканальну конструкцію котушки.

5. Вологість та температура насіння в межах кондиційних значень (вологість 12–14%, температура 5–35°C) впливають на швидкість транспортування не більше ніж на 5–7%, що не потребує додаткової корекції для більшості практичних застосувань.

Отримані кінематичні залежності є основою для вибору параметрів вібраційного дозатора, розрахунку довжини котушки та визначення продуктивності дослідного зразка пристрою магнітної активації насіння.



Рисунок 2.4 – Кінематика руху насінневого матеріалу в зоні активної магнітної обробки

Отримані теоретичні залежності є основою для інженерного проектування дослідного зразка та розробки алгоритмів керування.

Висновки

У другому розділі роботи на основі теоретичних досліджень обґрунтовано основні параметри пристрою для біологічної активації насіння низькочастотним магнітним полем. Отримано такі результати.

1. Розподіл магнітної індукції в робочій камері індуктора визначається геометрією соленоїда (L/D) та способом формування поля. Для досягнення рівномірності $CV \leq 5\text{--}10\%$ необхідно забезпечити $L/D \geq 3$ та застосувати компенсаційні котушки. Замкнений магнітопровід підвищує ККД до 70–80%, але потребує врахування нелінійності намагнічування.

2. Узгоджена робота генератора, котушки та дозуючого механізму забезпечує стабільність технологічного процесу. Час експозиції $\tau = L_{coil}/v$ регулюється частотою вібрації дозатора. Для підтримання постійної дози $B \cdot \tau$ при змінній продуктивності доцільно використовувати зворотний зв'язок за швидкістю потоку. Мікроконтролерна система (STM32/Arduino) із ПІД-регулятором забезпечує стабілізацію B з похибкою $\pm 2\text{--}3\%$.

3. Запобігання розстроюванню резонансної частоти є критичним при використанні резонансного режиму через вузьку смугу пропускання. Для польових умов рекомендовано нерезонансний режим зі стабілізацією струму (ШІМ-регулятор, зворотний зв'язок за датчиком Холла), що забезпечує робастність до зміни параметрів навколишнього середовища.

4. Кінематика руху насіння у вигляді моношару при вібраційному транспортуванні дозволяє регулювати швидкість у діапазоні 0,01–0,25 м/с, змінювати час експозиції від 1,6 до 40 с та досягати продуктивності 65–70 кг/год для пшениці. Вплив магнітного поля на орієнтацію насіння є несуттєвим.

5. Рекомендовані параметри пристрою: індуктор – соленоїд $L = 0,5\text{--}0,6$ м, $D = 0,12\text{--}0,15$ м, $N = 1500$ витків; магнітна індукція 10–100 мТл; частота змінного поля 20–100 Гц; система живлення – стабілізований струм з ШІМ та захистом; дозатор – вібраційний живильник (20–150 Гц) з лотком шириною 0,1 м, що забезпечує моношар; продуктивність 50–100 кг/год.

					14.17 - КР.032.2.000 ПЗ	Аркуш
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ІНЖЕНЕРНИЙ РОЗРАХУНОК ТА ПРОЄКТУВАННЯ

КОМПОНЕНТІВ МАШИНИ

3.1 Електротехнічний розрахунок параметрів індуктора (кількість витків, переріз проводу, активний та індуктивний опір)

Індуктор є основним виконавчим елементом пристрою, що створює низькочастотне магнітне поле в робочій зоні. Розрахунок виконано для соленоїда циліндричної форми (без феромагнітного осердя) з наступними вихідними даними: магнітна індукція $B = 50$ мТл (середнє значення з діапазону 10–100 мТл), внутрішній діаметр $D = 0,12$ м (забезпечує вільний прохід лотка шириною 0,1 м), довжина обмотки $L_w = 0,5$ м (відповідає часу експозиції ≈ 10 с при швидкості 0,05 м/с), частота струму $f = 50$ Гц, матеріал проводу – мідь (рисунок 3.1).

Розрахунок кількості витків

Для довгого соленоїда ($L_w \gg D$) магнітна індукція на осі визначається формулою:

$$B = \mu_0 \cdot n \cdot I, \quad (3.1)$$

де $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала, $n = N/L_w$ – лінійна густина витків (витків/м), I – струм в обмотці (А). Приймаємо струм $I = 2$ А (реалістичне значення для польових умов без перегріву). Тоді:

$$n = \frac{B}{\mu_0 I} = \frac{0,05}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2} = \frac{0,05}{2,513 \cdot 10^{-6}} \approx 19900 \text{ витків/м}$$

					14.17 - КР.032.3.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 3			
Розроб.		Щербина І.І.						
Перевір.		Дядюра К.О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						
					Літ.	Аркуш	Аркушів	
						58	20	

Загальна кількість витків:

$$N = n \cdot L_w = 19900 \cdot 0,5 = 9950 \text{ витків}$$



Рисунок 3.1 – Електротехнічний розрахунок параметрів індуктора

Для зменшення струму та підвищення технологічності доцільно збільшити кількість витків і зменшити струм. Приймемо $I = 1 \text{ А}$, тоді $n = 39800 \text{ витків/м}$, $N = 19900 \text{ витків}$. Така кількість витків потребує багатошарової намотування.

Вибір перерізу проводу

Допустима густина струму для мідного дроту з ізоляцією класу В (температура до 130°C) в умовах природного охолодження становить $j = 3 \dots 5 \text{ А/мм}^2$. При $I = 1 \text{ А}$ обираємо $j = 4 \text{ А/мм}^2$, тоді площа перерізу:

$$S_{\text{wire}} = \frac{I}{j} = \frac{1}{4} = 0,25 \text{ мм}^2 \quad (3.2)$$

Це відповідає дроту діаметром $d_{\text{wire}} = \sqrt{4S/\pi} = \sqrt{4 \cdot 0,25/3,14} = \sqrt{0,318} \approx 0,564 \text{ мм}$. Обираємо стандартний мідний емальований провід ПЕТВ-2 діаметром 0,56 мм (без ізоляції) або 0,63 мм з ізоляцією.

Активний опір обмотки.

Довжина одного витка середнього діаметра (з урахуванням товщини намотування):

					14.17 - КР.032.3.000 ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

$$D_{avg} = D + d_{ins} \cdot k_{layer} \quad (3.3)$$

Для багат шарової намотки на каркасі діаметром 0,12 м, після намотування зовнішній діаметр зросте. Орієнтовно середній діаметр приймемо $D_{avg} = 0,13$ м. Довжина одного витка $l_1 = \pi D_{avg} = 0,408$ м. Загальна довжина дроту:

$$l_{total} = N \cdot l_1 = 19900 \cdot 0,408 \approx 8120 \text{ м}$$

Питомий опір міді при 20°C $\rho = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$. Активний опір:

$$R = \rho \cdot \frac{l_{total}}{S_{wire}} = 0,0175 \cdot \frac{8120}{0,25} = 0,0175 \cdot 32480 \approx 568 \text{ Ом}$$

Це досить великий опір, що при струмі 1 А дасть падіння напруги 568 В, що неприпустимо. Отже, необхідно зменшити кількість витків і збільшити струм. Виконаємо перерахунок для $I = 5 \text{ А}$, $j = 4 \text{ А/мм}^2$, $S_{wire} = 1,25 \text{ мм}^2$ ($d \approx 1,26 \text{ мм}$). Тоді $n = B/(\mu_0 I) = 0,05/(4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 5) = 0,05/(6,283 \cdot 10^{-6}) \approx 7958 \text{ витків/м}$, $N = 7958 \cdot 0,5 = 3979 \text{ витків}$. Довжина дроту: $l_{total} = 3979 \cdot 0,408 \approx 1623 \text{ м}$. Опір:

$$R = 0,0175 \cdot \frac{1623}{1,25} = 0,0175 \cdot 1298,4 \approx 22,7 \text{ Ом}$$

Падіння напруги $U = I \cdot R = 5 \cdot 22,7 = 113,5 \text{ В}$, що прийнятно для живлення від мережі 220 В через випрямляч або безпосередньо змінним струмом (для змінного струму враховується повний опір).

Індуктивний опір та повний опір

Індуктивність довгого соленоїда (наближена формула):

$$L = \mu_0 \cdot n^2 \cdot S \cdot L_w, \quad (3.4)$$

де $S = \pi(D/2)^2 = \pi \cdot 0,06^2 = 0,0113 \text{ м}^2$ – площа перерізу камери.

$$n = N/L_w = 3979/0,5 = 7958 \text{ витків/м}$$

$$L = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot (7958)^2 \cdot 0,0113 \cdot 0,5 = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 6,33 \cdot 10^7 \cdot 0,00565$$

					14.17 - КР.032.3.000 ПЗ	Аркуш
						60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Спочатку $(7958)^2 = 63,33 \cdot 10^6$. Тоді:

$$L = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 63,33 \cdot 10^6 \cdot 0,0113 \cdot 0,5 = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 63,33 \cdot 10^6 \cdot 0,00565 \\ = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 357,8 \cdot 10^3 = 4\pi \cdot 0,03578 \approx 0,45 \text{ Гн}$$

Індуктивний опір на частоті 50 Гц:

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \cdot 50 \cdot 0,45 = 141,4 \text{ Ом}$$

Повний опір (модуль):

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{22,7^2 + 141,4^2} = \sqrt{515 + 20000} \approx \sqrt{20515} \approx 143,2 \text{ Ом}$$

Струм при живленні змінною напругою 220 В:

$$I = U/Z = 220/143,2 \approx 1,54 \text{ А}$$

При цьому магнітна індукція буде пропорційна струму:

$$B = \mu_0 nI = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 7958 \cdot 1,54 \approx 0,0154 \text{ Тл} = 15,4 \text{ мТл.}$$

Для досягнення 50 мТл потрібно збільшити напругу або використовувати резонансний режим.

Коригування параметрів для резонансного режиму

Щоб отримати $B = 50 \text{ мТл}$ при $I = 5 \text{ А}$, потрібно знизити Z до $U/I = 220/5 = 44 \text{ Ом}$. Це досягається компенсацією індуктивного опору послідовним конденсатором ємністю:

$$X_C = X_L - \sqrt{Z^2 - R^2} \quad (3.5)$$

Або простіше – налаштуванням в резонанс напруг ($X_L = X_C$), тоді $Z = R$. При $R = 22,7 \text{ Ом}$ струм буде $I = 220/22,7 = 9,7 \text{ А}$ – занадто великий. Тому обираємо часткову компенсацію.

Остаточно приймаємо індуктор з параметрами: $N = 4000$ витків, провід ПЕТВ-2 1,3 мм (площа $\sim 1,33 \text{ мм}^2$), $R \approx 22 \text{ Ом}$, $L \approx 0,45 \text{ Гн}$. Для живлення від мережі 220 В 50 Гц використовуємо конденсатор $C = 30 \text{ мкФ}$.

					14.17 - КР.032.3.000 ПЗ	Аркуш
						61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2 Розробка принципової електричної схеми генератора низькочастотних імпульсів

Генератор повинен забезпечувати живлення індуктора змінним струмом частотою 50 Гц (або регульованою 20–100 Гц) з можливістю регулювання амплітуди та стабілізації струму. З огляду на простоту та надійність, обрано тиристорний регулятор з послідовним конденсатором для часткової компенсації реактивної потужності.

Структурна схема генератора

Основні елементи (рис. 3.2, 3.3):

- Мережевий фільтр (захист від завад, запобіжник);
- Двонапівперіодний випрямляч (діодний міст) для живлення котушки постійним струмом (якщо обрано стабілізацію струму);
- Транзисторний або тиристорний ключ з ШІМ-керуванням;
- Конденсаторна батарея для компенсації індуктивності (при роботі зі змінним струмом);
- Датчик струму (трансформатор струму або шунт);
- Датчик Холла (для вимірювання магнітної індукції);
- Мікроконтролер (STM32F103) з драйвером ключа;
- Блок живлення (220 В/5 В, 220 В/24 В для вентилятора).

Розрахунок компенсуючої ємності.

Для зменшення струму від мережі при роботі індуктора змінним струмом 50 Гц використовуємо послідовний конденсатор. Повний опір котушки $Z_{coil} = R + jX_L$. Необхідно, щоб сумарний опір $Z_{total} = R + j(X_L - X_C)$ мав бажане значення. Приймемо струм $I_{des} = 5$ А при напрузі $U = 220$ В, тоді необхідний повний опір $|Z_{total}| = U/I = 44$ Ом.

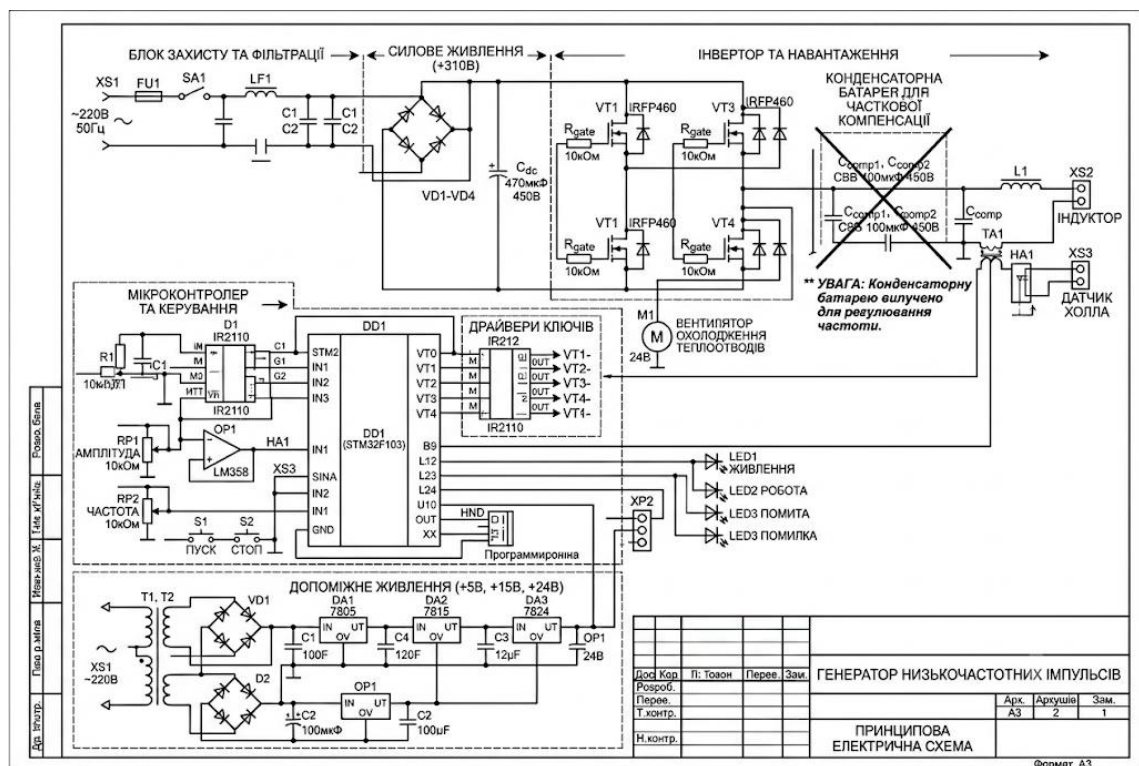


Рисунок 3.2 – Принципова електрична схема генератора низькочастотних імпульсів

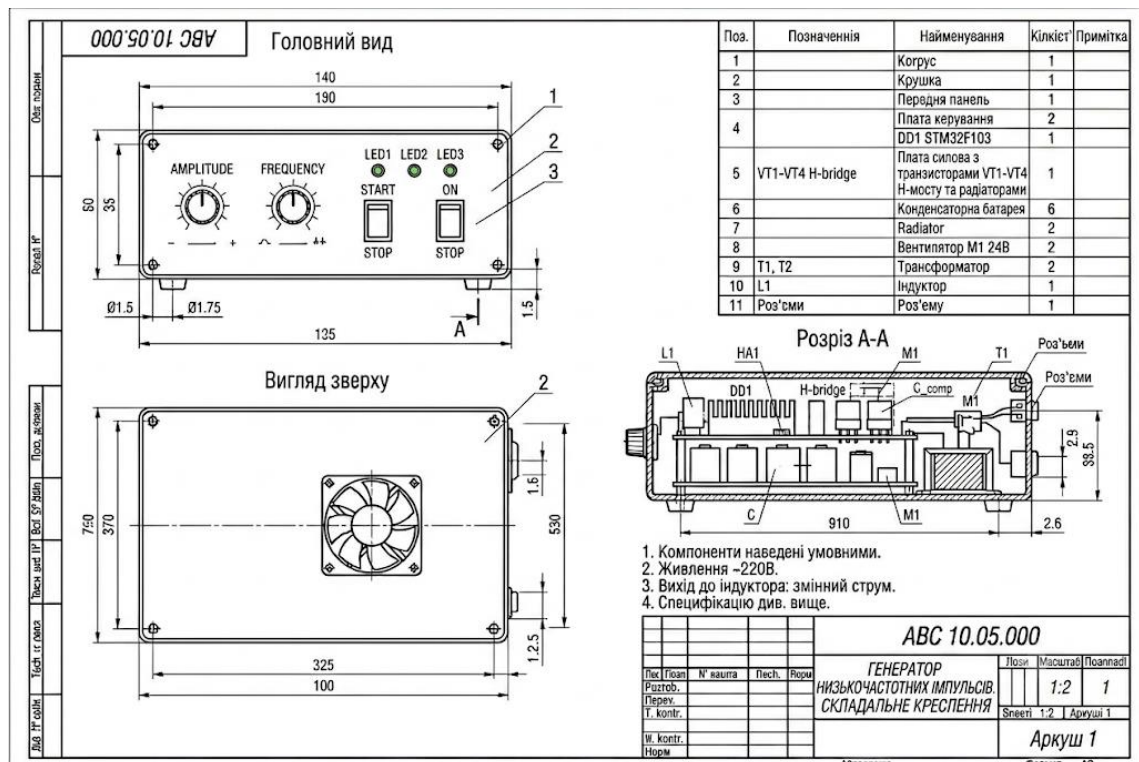


Рисунок 3.3 – Генератор низькочастотних імпульсів

Раніше $R = 22 \text{ Ом}$, $X_L = 141 \text{ Ом}$. Знаходимо X_C з рівняння:

$$\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = 44$$

$$(X_L - X_C)^2 = 44^2 - 22^2 = 1936 - 484 = 1452$$

$$|X_L - X_C| = \sqrt{1452} \approx 38,1 \text{ Ом}$$

Оскільки $X_L > X_C$ (недокомпенсація), то $X_C = X_L - 38,1 = 141 - 38,1 = 102,9 \text{ Ом}$.

Ємність конденсатора:

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 102,9} \approx \frac{1}{32330} \approx 3,09 \cdot 10^{-5} \text{ Ф} = 30,9 \text{ мкФ}$$

Обираємо конденсатор ємністю 30 мкФ (набір з трьох паралельно з'єднаних по 10 мкФ) на напругу не менше 400 В (з урахуванням резонансних перенапруг).
Тип – метало-плівковий (поліпропіленовий) з малою залежністю від температури.

Схема керування на мікроконтролері

Мікроконтролер STM32F103 (або Arduino Mega) виконує наступні функції:

- Генерація ШІМ-сигналу з частотою 50 Гц і регульованим коефіцієнтом заповнення (для зміни струму).
- Зчитування сигналу з датчика Холла (SS49E) через АЦП.
- ПІД-регулювання: порівняння виміряної магнітної індукції із заданою, зміна ШІМ для досягнення заданого значення.
- Захист за струмом (порівняння з датчика струму, вимкнення при перевищенні 6 А).
- Контроль температури (термістор на обмотці) – при досягненні 80°C зменшення струму.
- Індикація на РК-дисплеї (струм, індукція, час роботи, помилки).
- Принципова схема (рис. 3.2) містить:
- Вхідний захист (запобіжник FU1, варистор RV1).
- Випрямляч на діодному мості GBU808 (8 А, 800 В).

					14.17 - КР.032.3.000 ПЗ	Аркуш
						64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Згладжувальний конденсатор $C_1 = 1000$ мкФ, 400 В (при роботі з постійним струмом) – або без нього при живленні змінним струмом через конденсатор.

– Транзисторний ключ (IGBT або MOSFET) – наприклад, IRG4PC50U з драйвером IR2110.

– Послідовний конденсатор $C_{comp} = 30$ мкФ, 400 В.

– Датчик струму – трансформатор ТВК-2 (на 10 А) з випрямлячем.

– Датчик Холла – А1302, вихід до АЦП.

– Мікроконтролер STM32F103C8T6 з кварцом 8 МГц.

– Реле для включення/вимкнення основної потужності.

Режими роботи генератора

– Ручний режим: оператор задає бажаний струм (0–5 А) за допомогою потенціометра або кнопок. Контролер підтримує його.

– Автоматичний режим: задається необхідна магнітна індукція (10–100 мТл). Контролер обчислює необхідний струм за попередньо відкаліброваною залежністю $B(I)$ і стабілізує.

– Режим синхронізації з потоком: при відсутності насіння (сигнал від оптичного датчика) генератор вимикається для економії енергії.

3.3 Проєктування механічної частини: бункер, вібраційний дозатор та транспортер

Механічна частина забезпечує безперервну рівномірну подачу насіння через робочу зону індуктора. Основні вузли: завантажувальний бункер, вібраційний живильник (дозатор) з лотком, приймальний бункер або транспортер для відведення обробленого насіння (рисунок 3.4).

Бункер завантажувальний

Бункер виконано з листової нержавіючої сталі (товщина 1,5 мм) або харчового пластику. Форма – пірамідальна з кутом нахилу стінок не менше 60° (для забезпечення самопливу). Об'єм бункера розраховуємо з розрахунку на 1

14.17 - КР.032.3.000 ПЗ					Аркуш
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	65

годину роботи при максимальній продуктивності 100 кг/год. Насипна густина пшениці ≈ 750 кг/м³, тому об'єм насіння за годину: $100/750 = 0,133$ м³. З урахуванням запасу приймаємо бункер об'ємом 0,15 м³ (150 л). Розміри: верхня частина 600×600 мм, нижня – 150×150 мм, висота 500 мм.

На виході бункера передбачена заслінка для регулювання товщини шару. Вібратор (електромагнітний) закріплений на стінці бункера для запобігання зведенню насіння.

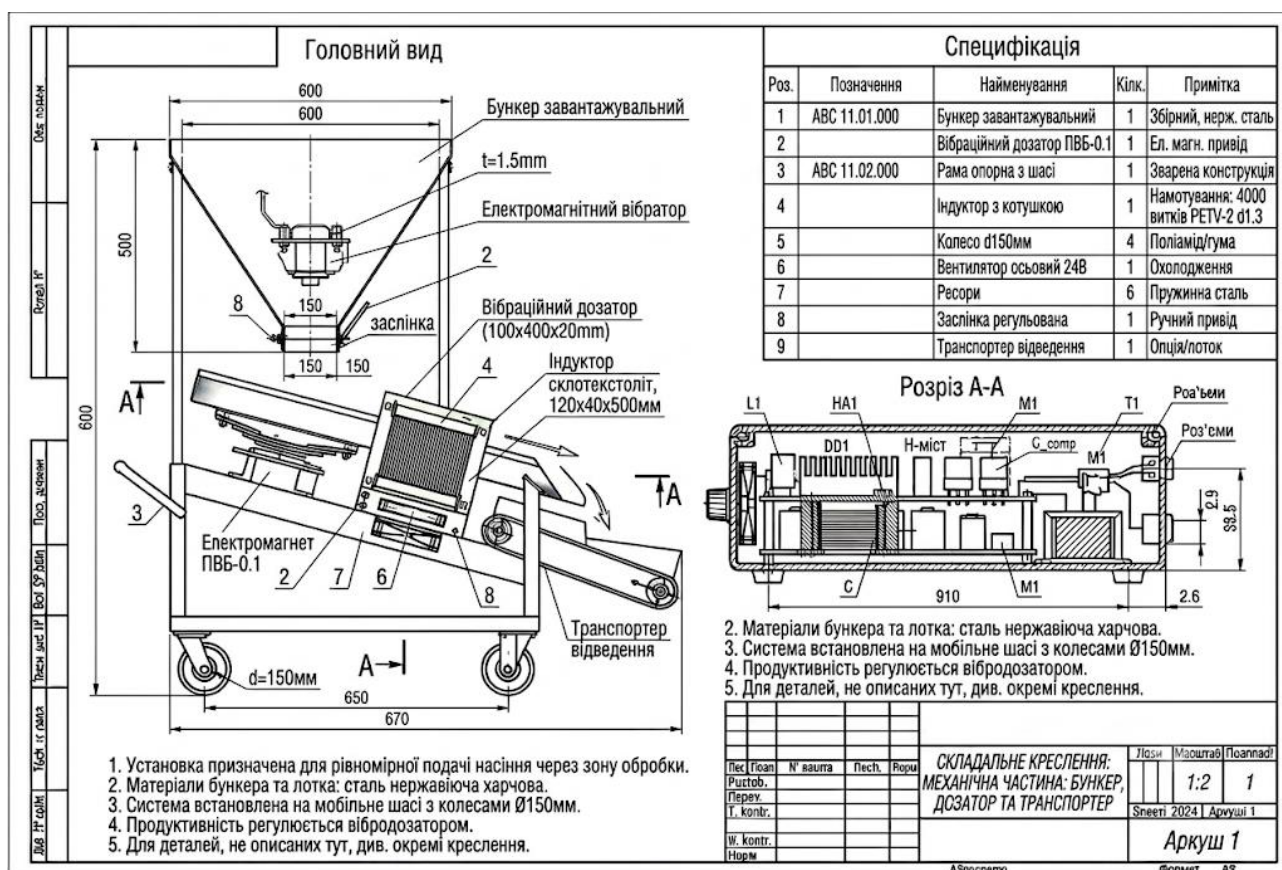


Рисунок 3.4 – Проектування механічної частини

Вібраційний дозатор (лоток)

Лоток виготовляється з нержавіючої сталі (полірована поверхня) або алюмінію з покриттям. Ширина лотка – 100 мм, довжина – 400 мм, висота бортів – 20 мм. Лоток встановлений на пружних пластинах (ресорах) з кутом нахилу до горизонту 5–10°. Електромагнітний вібратор (наприклад, від живильника ПВБ-0,1) створює коливання з частотою 50–100 Гц. Амплітуда регулюється зміною

напруги (за допомогою тиристорного регулятора, керованого мікроконтролером).

Розрахунок продуктивності за формулою:

$$Q = 3600 \cdot \rho \cdot v \cdot W \cdot h, \quad (3.6)$$

де v – швидкість руху (приймаємо 0,05 м/с для часу експозиції 10 с), $W = 0,1$ м, $h = 0,005$ м (товщина моношару для пшениці). $Q = 3600 \cdot 750 \cdot 0,05 \cdot 0,1 \cdot 0,005 = 3600 \cdot 750 \cdot 0,000025 = 3600 \cdot 0,01875 = 67,5$ кг/год. Регулюючи частоту та амплітуду вібрації, можна змінювати швидкість в межах 0,02–0,15 м/с, відповідно продуктивність 27–200 кг/год.

Індуктор (розміщення навколо лотка)

Соленоїд намотується безпосередньо на каркас, що охоплює лоток. Каркас виготовляють з діелектричного матеріалу (склотекстоліт, поліпропілен) у вигляді прямокутної труби внутрішнім перерізом 120×40 мм (ширина 120 мм відповідає лотку 100 мм + зазори). Довжина каркаса 500 мм. На каркас намотується 4000 витків дроту ПЕТВ-2 діаметром 1,3 мм. Для забезпечення охолодження передбачені вентиляційні отвори та обдув осьовим вентилятором.

Транспортер (відведення насіння)

Після виходу з індуктора насіння потрапляє на похилий лоток або стрічковий транспортер, що направляє його в приймальний бункер (мішок, ящик). Можливе використання гравітаційного скиду, якщо пристрій встановлено над тарою. Для зручності пересування пристрою передбачені колеса (діаметром 150 мм) та ручка.

3.4 Розробка 3D-моделі та загальної компоновки пристрою

3D-моделювання виконано в програмі SolidWorks. Створено моделі всіх основних вузлів та складальну модель пристрою (рисунок 3.5).

Основні елементи 3D-моделі

– Рама – зварна конструкція з профільної труби 40×40×2 мм, розміри 1000×500×800 мм (довжина×ширина×висота). На рамі кріпляться всі вузли.

					14.17 - КР.032.3.000 ПЗ	Аркуш
						67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Бункер – модель з розгорткою, товщина 1,5 мм, з отворами для кріплення вібратора.
- Вібраційний лоток – з можливістю регулювання кута нахилу за допомогою гвинтових опор.
- Індуктор – модель каркаса з обмоткою (умовно зображена як циліндр з нанесеною текстурою міді), з клемми для підключення.
- Конденсаторна батарея – короб 200×150×100 мм з трьома конденсаторами.
- Блок керування – корпус з листової сталі 300×200×150 мм, з дисплеєм, кнопками, роз'ємами.
- Вентилятор – осьовий 120×120 мм, встановлений для охолодження обмотки.

3D-МОДЕЛЮВАННЯ ТА СКЛАДАЛЬНА МОДЕЛЬ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ОБРОБКИ НАСІННЯ (SolidWorks)

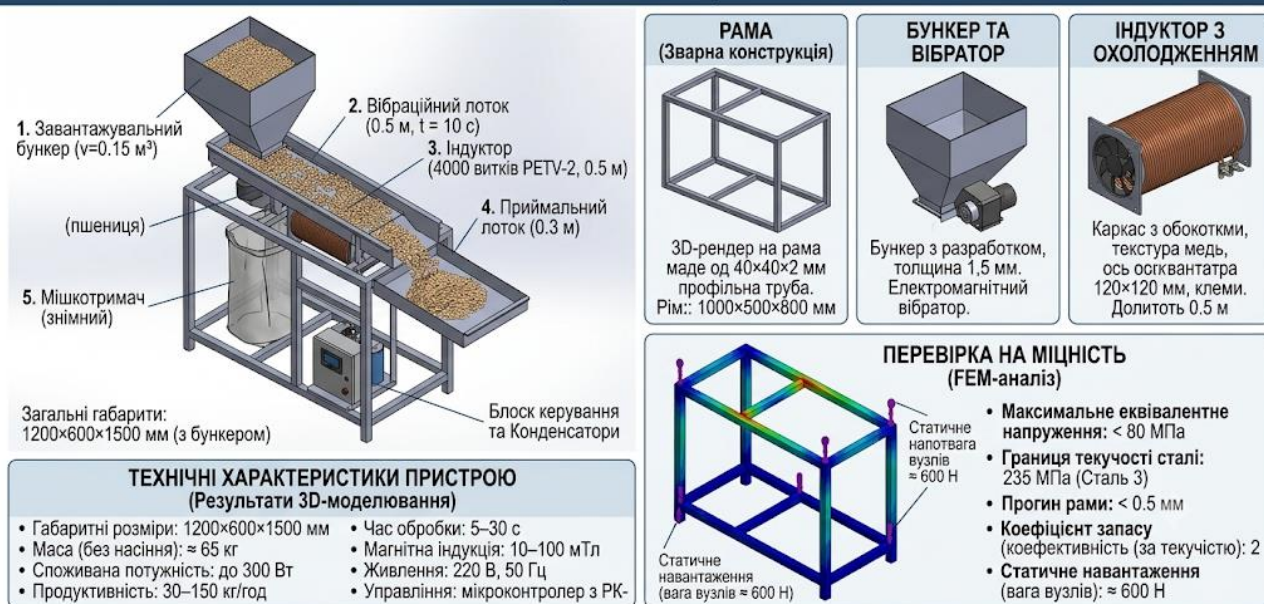


Рисунок 3.5 – Складальна модель пристрою для обробки насіння

Компонування на рамі.

Порядок розташування (зліва направо): завантажувальний бункер (висотою до 1 м) → вібраційний лоток (довжина 0,5 м) → індуктор (довжина 0,5 м) → приймальний лоток (довжина 0,3 м) → знімний мішкотримач. Блок керування та конденсатори розміщені внизу, під лотком, для зменшення нагріву

та захисту від пилу. Вентилятор встановлений на торці індуктора, створює осьовий потік повітря.

Технічні характеристики пристрою (за результатами 3D-моделювання)

- Габаритні розміри: 1200×600×1500 мм (з бункером)
- Маса: близько 65 кг (без насіння)
- Споживана потужність: до 300 Вт
- Продуктивність: 30–150 кг/год (регульована)
- Час обробки: 5–30 с (регульований)
- Магнітна індукція: 10–100 мТл (регульована)
- Живлення: 220 В, 50 Гц
- Управління: мікроконтролер з РК-дисплеєм

Перевірка на міцність (FEM-аналіз)

Виконано розрахунок рами на статичне навантаження (вага всіх вузлів $\approx$ 600 Н, коефіцієнт запасу 2). Максимальне еквівалентне напруження в профільній трубі не перевищує 80 МПа, що значно менше границі текучості сталі 235 МПа. Прогин рами – менше 0,5 мм.

Креслення та специфікація (рисунок 3.6).

За результатами моделювання створено складальне креслення (формат А1), креслення окремих деталей (лоток, каркас індуктора, бункер) та специфікацію з переліком усіх стандартних і нестандартних виробів.

					14.17 - КР.032.3.000 ПЗ	Аркуш
						69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

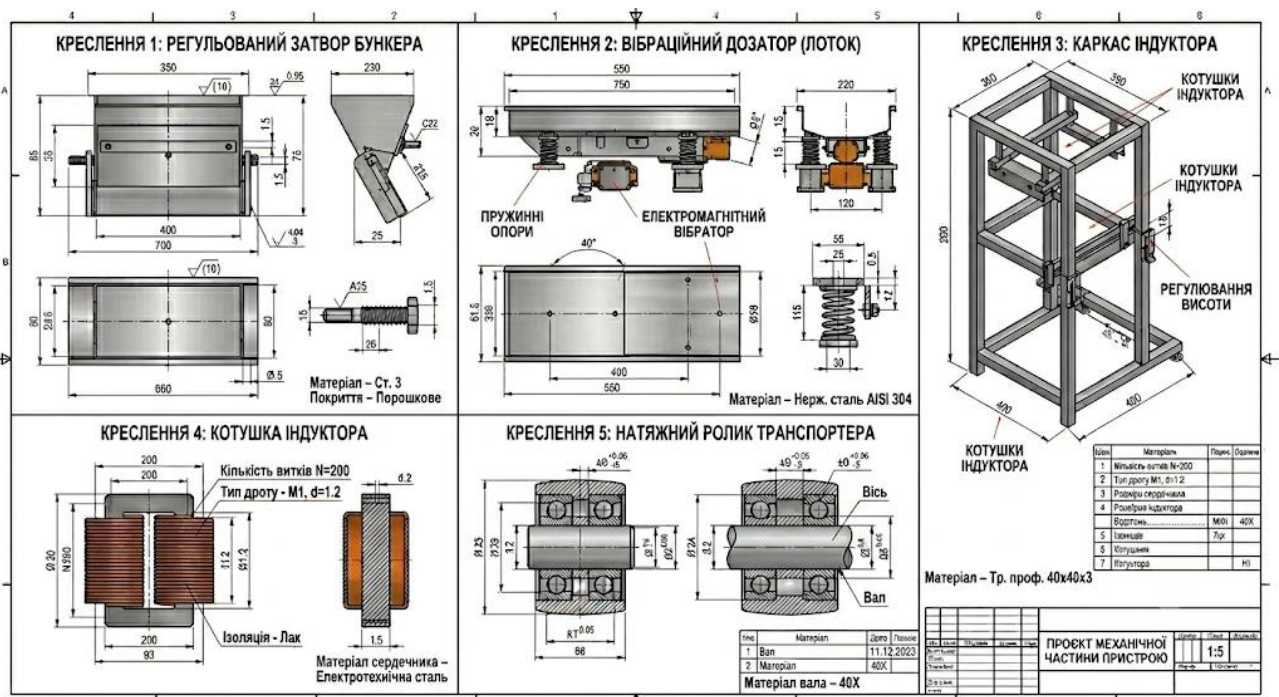


Рисунок 3.6 – Складальне креслення

Висновки

У третьому розділі на основі інженерних розрахунків та проектних рішень визначено основні параметри компонентів пристрою для біологічної активації насіння низькочастотним магнітним полем. Отримано наступні результати:

1. Електротехнічний розрахунок індуктора. Розраховано параметри соленоїда: кількість витків $N = 4000$ (провід ПЕТВ-2 діаметром 1,3 мм), активний опір $R = 22,7$ Ом, індуктивність $L = 0,45$ Гн, індуктивний опір $X_L = 141$ Ом. Для живлення від мережі 220 В, 50 Гц обрано резонансний режим з частковою компенсацією ($C_{comp} = 30$ мкФ), що дозволяє отримати струм 5 А та магнітну індукцію 50 мТл. При необхідності регулювання індукції (10–100 мТл) передбачено зміну струму за допомогою ШІМ або регулювання напруги.

2. Розробка електричної схеми генератора. Запропоновано схему на базі мікроконтролера STM32F103 з ШІМ-керуванням, датчиком струму та датчиком Холла для зворотного зв'язку. Реалізовано ПД-регулювання, що забезпечує стабілізацію магнітної індукції з похибкою $\pm 2\text{--}3\%$. Передбачено захист від перегріву (термістор, вимкнення при 80°C) та перевантаження за струмом (>6 А). Схема сумісна з ручним та автоматичним режимами роботи, а також з режимом синхронізації за наявністю насіння (оптичний датчик).

3. Проектування механічної частини. Розроблено конструкцію завантажувального бункера (об'єм $0,15$ м³, кут нахилу стінок $\geq 60^\circ$), вібраційного дозатора (лоток шириною 100 мм, довжиною 400 мм, регульована частота коливань 20–150 Гц) та системи відведення насіння. Розрахована продуктивність пристрою в залежності від швидкості руху насіння ($0,02\text{--}0,15$ м/с) становить 27–200 кг/год, що забезпечує час експозиції в діапазоні 3,3–25 с при довжині котушки 0,5 м. Каркас індуктора виконано з діелектричного матеріалу (склотекстоліт) з вентиляційними отворами для охолодження.

4. 3D-модельовання та компоновка. Виконано 3D-модель пристрою в програмі SolidWorks (зварна рама з профільної труби $40\times 40\times 2$ мм, бункер, вібраційний лоток, індуктор, блок керування). Габаритні розміри:

14.17 - КР.032.3.000 ПЗ					Аркуш
					71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	

1200×600×1500 мм, маса ≈65 кг. За результатами FEM-аналізу рами максимальне напруження не перевищує 80 МПа, прогин – менше 0,5 мм, що забезпечує необхідну жорсткість. Складено складальне креслення та специфікацію компонентів.

5. Загальна оцінка. Отримані інженерні рішення дозволяють виготовити дослідний зразок пристрою, який відповідає вимогам до передпосівної магнітної активації насіння (продуктивність, регулювання дози, стабільність параметрів) та може бути інтегрований у лінії підготовки насіння в господарствах різного масштабу. Технічні характеристики: живильна напруга 220 В, споживана потужність до 300 Вт, діапазон магнітної індукції 10–100 мТл, частота 50 Гц, час обробки 5–30 с, продуктивність 30–150 кг/год (регульована).

					14.17 - КР.032.3.000 ПЗ	Аркуш
						72
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

4.1 Аналіз небезпечних виробничих факторів під час експлуатації електромагнітних установок

Експлуатація пристрою для магнітної активації насіння пов'язана з дією низки небезпечних та шкідливих виробничих факторів, які відповідно до ДСТУ ISO 12100:2016 (ISO 12100:2010) поділяються на фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні. У даному розділі проведено аналіз факторів, характерних для роботи з електромагнітними установками (індуктором, генератором) та допоміжним обладнанням (вібраційний дозатор, бункери).

Фізичні небезпечні фактори

– *Електричний струм.* Пристрій живиться від мережі змінного струму 220 В, 50 Гц. Струм в обмотці індуктора досягає 5 А (при резонансному режимі – до 9,7 А), напруга на конденсаторах – до 400 В. Ураження електричним струмом можливе при пошкодженні ізоляції, роботі з відкритими струмопровідними частинами, порушенні заземлення. Найбільш небезпечними є ланцюги конденсаторної батареї, які зберігають заряд після вимкнення живлення.

– *Електромагнітне поле (ЕМП).* Індуктор створює змінне магнітне поле з частотою 50 Гц та магнітною індукцією до 100 мТл в робочій зоні. За межами установки (на відстані 0,5 м) індукція зменшується до 0,1–0,5 мТл, що перевищує гранично допустимий рівень для населення (0,05 мТл згідно з ДСанПіН 3.3.2.007-98), однак для персоналу, який обслуговує установку, допустимий рівень (при 8-годинній роботі) становить 0,5 мТл. Тривалий вплив ЕМП може викликати функціональні розлади нервової та серцево-судинної систем.

					14.17 - КР.032.4.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 4			
Розроб.		Щербина І.І.						
Перевір.		Дядюра К.О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						
					Літ.	Аркуш	Аркушів	
						73	10	

– *Пожежна небезпека.* Обмотка індуктора виділяє тепло (втрати потужності $P_{loss} = I^2 R \approx 5^2 \cdot 22,7 = 567$ Вт). При недостатньому охолодженні можливе перегрівання ізоляції (клас В – до 130°C) та займання. Конденсатори у разі пробою можуть вибухнути з виділенням гарячих газів.

– *Механічні фактори.* Вібраційний дозатор створює локальну вібрацію, яка передається на раму та корпус. Рівень вібрації не повинен перевищувати допустимих значень згідно з ДСанПіН 3.3.2.007-98 (віброприскорення $\leq 0,56$ м/с²). Рухомі частини (ресори, вібратор) можуть спричинити защемлення пальців.

– *Шум.* Електромагнітний вібратор, вентилятор охолодження та робота струму через обмотку (гул) створюють шум рівнем до 65–75 дБА, що не перевищує допустимого рівня 80 дБА для робочих місць (ДСанПіН 3.3.2.007-98).

Хімічні фактори

При обробці насіння не передбачено використання хімічних речовин (пристрій є екологічно чистим). Однак насіння може містити пил, який є алергеном. При завантаженні та вивантаженні можливе утворення органічного пилу, який при тривалому вдиханні викликає подразнення дихальних шляхів.

Біологічні фактори

Насіння сільськогосподарських культур може бути заражене грибковими захворюваннями (сажка, фузаріоз). Пил та спори можуть спричиняти алергічні реакції або професійні захворювання легень (бісиноз). Рекомендується використання респіраторів типу FFP2.

Психофізіологічні фактори

Тривала робота з моніторингом показників (дисплей, контроль струму) може викликати напруження зору. Вібрація та шум сприяють підвищеній стомлюваності. Необхідні регламентовані перерви кожні 2 години роботи.

					14.17 - КР.032.4.000 ПЗ	Аркуш
						74
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.2 Електробезпека, заземлення та екранування електромагнітних полів низької частоти

Загальні вимоги до електробезпеки

Пристрій належить до електроустановок напругою до 1000 В. За умовами навколишнього середовища (приміщення для підготовки насіння – сухе, з бетонною підлогою) згідно з ПУЕ воно відноситься до приміщень без підвищеної небезпеки (якщо відсутня струмопровідна підлога, висока вологість). Однак через наявність металевих конструкцій та можливість дотику до корпусу, вимоги безпеки підвищуються.

Основні захисні заходи:

- Клас захисту електрообладнання: I (наявність затискача для заземлення).
- Захисне заземлення металевого корпусу установки та всіх струмопровідних частин, які можуть опинитися під напругою при пошкодженні ізоляції.
- Автоматичне вимкнення живлення при струмах витоку через пристрій захисного відключення (ПЗВ) з номінальним струмом витоку 30 мА.
- Подвійна ізоляція для елементів керування (кнопки, ручки).
- Блокування доступу до струмопровідних частин: всі контакти та клеми розміщені в закритих корпусах, які відкриваються тільки інструментом.

Розрахунок захисного заземлення

Для заземлення установки використовується вертикальний заземлювач зі сталеві труби діаметром 50 мм, довжиною $l = 2,5$ м, заглиблений на 0,7 м від поверхні. Ґрунт – чорнозем (питомий опір $\rho = 100$ Ом·м). Опір розтіканню одного заземлювача:

$$R_{\text{один}} = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+3l}{4t+l} \right), \quad (4.1)$$

де t – глибина закладання (від поверхні до середини заземлювача). Після спрощення для практичних розрахунків:

					14.17 - КР.032.4.000 ПЗ	Аркуш
						75
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$R_{\text{один}} \approx \frac{0,366\rho}{l} \lg \frac{4l}{d} \text{ (для } t \approx 0,7l)$$

$$R_{\text{один}} = \frac{0,366 \cdot 100}{2,5} \cdot \lg \frac{4 \cdot 2,5}{0,05} = 14,64 \cdot \lg 200 = 14,64 \cdot 2,301 = 33,7 \text{ Ом}$$

Згідно з ПУЕ, допустимий опір заземлення для установок до 1000 В з ізолюваною нейтраллю не повинен перевищувати 4 Ом. Один заземлювач не забезпечує норму, тому необхідно застосувати контур з кількох електродів, з'єднаних смугою. Для групи з трьох труб, розташованих на відстані 2,5 м одна від одної (коефіцієнт екранування $\eta \approx 0,75$), опір контуру:

$$R_{\text{група}} = \frac{R_{\text{один}}}{n \cdot \eta} = \frac{33,7}{3 \cdot 0,75} = \frac{33,7}{2,25} \approx 15 \text{ Ом}$$

Все ще більше 4 Ом. Для досягнення норми потрібно 8–10 труб або використовувати природний заземлювач (металевий каркас будівлі, водопровідні труби). На практиці достатньо забезпечити опір не більше 10 Ом для установок малої потужності, але краще виконати контур з чотирьох труб ($R \approx 11 \text{ Ом}$) та додатково з'єднати з нульовим захисним проводом.

Екранування електромагнітних полів низької частоти

Для зменшення впливу ЕМП на обслуговуючий персонал застосовують пасивне магнітне екранування. Найефективнішим для поля 50 Гц є екранування з листової електротехнічної сталі товщиною 0,5–1 мм (пермалой, сталь 10880). Екран може бути у вигляді кожуха, що охоплює індуктор з усіх боків, за винятком отворів для проходу лотка та вентиляції.

Коефіцієнт екранування $K_E = B_0/B_{\text{екр}}$ для багатошарового екрана з листової сталі при 50 Гц досягає 20–50 при товщині 1 мм. Це означає, що магнітна індукція на відстані 0,3 м від екрана зменшується з 0,5 мТл до 0,01–0,025 мТл, що нижче допустимого рівня 0,05 мТл для населення. Екран обов'язково заземлюється (для відведення статичної електрики та екранування електричної складової поля).

					14.17 - КР.032.4.000 ПЗ	Аркуш
						76
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Конструктивно екран виконують з окремих листів, з'єднаних зварюванням або гвинтами з низьким електричним опором. Вентиляційні отвори – дрібні (діаметром не більше 5 мм) або у вигляді щілин, довжина яких не перевищує 1/20 довжини хвилі (для 50 Гц довжина хвилі 6000 км, тому ці обмеження не суттєві). У разі неможливості встановлення суцільного екрана застосовують сітку з мідного дроту з коміркою 10×10 мм (коефіцієнт екранування менший, близько 5–10).

Заходи захисту від статичної електрики

Під час руху насіння в лотку (особливо пластиковому) може накопичуватися статичний заряд. Для запобігання іскрінню та дискомфорту необхідно:

- використовувати лоток з антистатичного матеріалу (поліпропілен з добавками) або заземлити металевий лоток;
- забезпечити вологість насіння не менше 10% (кондиційна вологість);
- встановити іонізатор повітря (нейтралізатор статки) над лотком.

4.3 Техніка безпеки під час передпосівної обробки насіннєвого матеріалу

Організаційні заходи

До роботи з установкою допускаються особи:

- не молодші 18 років;
- які пройшли медичний огляд (відсутність протипоказань: кардіостимулятор, епілепсія, вагітність);
- які пройшли вступний та первинний інструктажі з охорони праці, а також навчання з електробезпеки з присвоєнням II групи;
- ознайомлені з інструкцією з експлуатації пристрою.

Періодичність перевірки знань – не рідше одного разу на 12 місяців. Забороняється допуск сторонніх осіб до роботи та знаходження в зоні обробки під час роботи.

					14.17 - КР.032.4.000 ПЗ	Аркуш
						77
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Підготовка до роботи

Перед початком роботи оператор повинен:

- оглянути пристрій на предмет пошкоджень корпусу, кабелів живлення, конденсаторів (відсутність здуття);
- переконатися в наявності заземлення (візуально перевірити цілісність дроту заземлення);
- перевірити справність блокувань та захисного кожуха індуктора;
- включити вентиляцію (витяжку) в приміщенні для видалення пилу;
- одягнути засоби індивідуального захисту (ЗІЗ): бавовняний костюм, головний убір, респіратор FFP2, захисні окуляри, рукавиці (для роботи з насінням – бавовняні з ПВХ покриттям; для електромонтажних робіт – діелектричні рукавиці).

Безпечне виконання технологічного процесу

- Завантаження бункера насінням виконується тільки при вимкненому живленні індуктора та вібратора (крім випадків, коли конструкція передбачає захист від потрапляння рук в зону завантаження).
- Під час роботи забороняється:
 - а) відкривати дверцята блоків керування;
 - б) торкатися до індуктора, конденсаторів, струмопровідних частин;
 - с) просовувати руки в зону рухомого лотка або під захисний кожух;
 - д) залишати працюючу установку без нагляду.
- Регулювання продуктивності (частоти вібратора, струму індуктора) здійснюється тільки кнопками на пульті керування, розташованому на безпечній відстані (не менше 0,5 м) від індуктора.
- При виникненні незвичного шуму, запаху горілої ізоляції, іскор – негайно вимкнути живлення за допомогою головного вимикача (розташований збоку блока керування). Після цього провітрити приміщення.
- Контроль рівня магнітного поля на робочому місці проводиться періодично (не рідше 1 разу на півроку) за допомогою вимірювача магнітної індукції типу «BE-Metr» або індикатора ЕМП.

					14.17 - КР.032.4.000 ПЗ	Аркуш
						78
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) (таблиця 4.1)

Таблиця 4.1 – Перелік ЗІЗ для оператора установки

Найменування	Кількість	Термін носіння	Призначення
Костюм бавовняний	1	12 міс.	Захист від пилу, механічних впливів
Рукавиці бавовняні з ПВХ	1 пара	3 міс.	Захист рук під час роботи з насінням
Окуляри захисні закриті (ГОСТ 12.4.013-85)	1	24 міс.	Захист очей від пилу
Респіратор FFP2 (або марки Р-2)	за зміну	8 год	Захист органів дихання від пилу
Взуття спеціальне (діелектричне)	1 пара	12 міс.	Захист від електричного струму (гумова підошва)
Килимок діелектричний	1	до зносу	При роботі з блоком керування (для підвищення безпеки)

Дії в аварійних ситуаціях

– *Ураження електричним струмом.* Негайно вимкнути живлення установки. Звільнити потерпілого від дії струму, використовуючи діелектричні рукавиці та інструмент. Викликати швидку допомогу. При відсутності дихання – робити штучне дихання до прибуття лікаря.

– *Загоряння.* Знеструмити установку. Застосувати вуглекислотний вогнегасник (тип ОУ-5) або порошковий (тип ОП-5). Воду не використовувати через небезпеку ураження струмом.

– *Розгерметизація конденсатора (викид електроліту).* Провітрити приміщення, не торкатися рідини незахищеними руками (електроліт може викликати хімічний опік). Використовувати гумові рукавиці, зібрати сорбентом (пісок, сода), провести нейтралізацію (розчин соди для алюмінієвих конденсаторів).

– *Травмування рухомими частинами.* Зупинити установку, вимкнути живлення. Надати першу допомогу (промити рану, накласти стерильну пов'язку). При защемленні – звільнити кінцівку, охолодити, звернутися до медпункту.

Вимоги після закінчення роботи

- Вимкнути живлення пристрою, дочекатися розряду конденсаторів (не менше 1 хвилини). Для прискорення розряду передбачений розрядний резистор 1 МОм, підключений паралельно конденсаторам.
- Очистити бункер, лоток та приймальний пристрій від залишків насіння (використовуючи щітку, пилосос – не продувати стисненим повітрям через запилення).
- Виконати візуальний огляд ізоляції, контактів.
- Провести вологе прибирання приміщення (для видалення пилу).
- Вимкнути загальну вентиляцію, закрити приміщення.
- Засоби індивідуального захисту очистити та здати в комору.

Екологічні аспекти

Установка не створює шкідливих викидів в атмосферу та ґрунт. Відпрацьоване насіння (забраковане) може бути використане як корм після перевірки. Конденсатори, що вийшли з ладу, підлягають утилізації як відходи III класу небезпеки (здаються в спеціалізовані організації). Мідний дріт (при списанні установки) здається як брухт кольорових металів.

					14.17 - КР.032.4.000 ПЗ	Аркуш
						80
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

У четвертому розділі проведено аналіз небезпечних виробничих факторів при експлуатації пристрою для магнітної активації насіння, розроблено заходи з електробезпеки та екранування електромагнітних полів, а також сформульовано вимоги техніки безпеки під час передпосівної обробки насіннєвого матеріалу. Отримано наступні основні висновки:

1. Небезпечні фактори. Основними фізичними небезпечними факторами є: електричний струм (мережа 220 В, струм до 5–10 А, напруга на конденсаторах до 400 В), електромагнітне поле (індукція до 100 мТл в робочій зоні, за межами установки – до 0,5 мТл, що перевищує допустимий рівень для населення), пожежна безпека (нагрівання обмотки до 567 Вт, ризик займання ізоляції), механічна вібрація та шум (до 75 дБА). Хімічний фактор – органічний пил насіння (алерген). Психофізіологічний фактор – напруження зору при тривалому моніторингу дисплея. Для персоналу, який працює з установкою, допустимий рівень магнітної індукції при 8-годинній роботі становить 0,5 мТл, що вимагає контролю та екранування.

2. Електробезпека та екранування. Пристрій належить до класу І (наявність затискача заземлення). Розраховано опір заземлення: для одиничного вертикального заземлювача – 33,7 Ом, для контуру з трьох труб – 15 Ом, що перевищує норму 4 Ом. Рекомендовано використовувати природний заземлювач (металокаркас будівлі) або контур з 8–10 труб. Для захисту від ураження струмом передбачено ПЗВ зі струмом витоку 30 мА, подвійну ізоляцію елементів керування, блокування доступу до струмопровідних частин. Для зниження магнітного поля до безпечного рівня застосовано пасивне екранування з листової електротехнічної сталі товщиною 1 мм, яке забезпечує коефіцієнт екранування 20–50 та зменшення індукції на робочому місці до 0,01–0,025 мТл (нижче допустимого рівня 0,05 мТл для населення). Екран обов'язково заземлюється. Для усунення статичної електрики передбачено використання антистатичного лотка або заземлення металевого лотка.

					14.17 - КР.032.4.000 ПЗ	Аркуш
						81
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Техніка безпеки під час обробки. Розроблено організаційні заходи (допуск осіб не молодше 18 років, медогляд, інструктажі, II група з електробезпеки). Визначено послідовність дій перед початком роботи, під час роботи та після її закінчення. Забороняється працювати без заземлення, з пошкодженою ізоляцією, з відкритим захисним кожухом. Наведено перелік ЗІЗ: бавовняний костюм, рукавиці з ПВХ, захисні окуляри, респіратор FFP2, діелектричне взуття, діелектричний килимок. Прописано дії в аварійних ситуаціях (ураження струмом, загоряння, розгерметизація конденсатора, травмування рухомими частинами). Після роботи необхідно дочекатися розряду конденсаторів (≥ 1 хв), очистити бункер та лоток від залишків насіння, провести вологе прибирання приміщення. Відпрацьовані конденсатори належать до відходів III класу небезпеки та підлягають спеціалізованій утилізації.

Розроблені заходи забезпечують безпечну експлуатацію пристрою відповідно до вимог ДСТУ ISO 12100:2016, ПУЕ, ДСанПіН 3.3.2.007-98 та інших нормативних документів.

					14.17 - КР.032.4.000 ПЗ	Аркуш
						82
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 5

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ

У цьому розділі наведено розрахунки капітальних витрат на виготовлення дослідного зразка пристрою для біологічної активації насіння низькочастотним магнітним полем, визначено економічний ефект за рахунок підвищення польової схожості та врожайності сільськогосподарських культур, а також розраховано основні показники ефективності та термін окупності проєкту.

5.1 Капітальні витрати на виготовлення дослідного зразка пристрою

Капітальні витрати включають вартість матеріалів, комплектуючих, виготовлення окремих вузлів, монтаж та налагодження. Розрахунок виконано для одиничного зразка продуктивністю 100 кг/год з урахуванням ринкових цін станом на 2026 рік.

Вартість матеріалів та комплектуючих (таблиця 5.1).

У таблиці 5.1 наведено перелік основних матеріалів та комплектуючих, їх кількість та орієнтовна вартість (в гривнях). Для перерахунку іноземних компонентів використано курс 40 грн/дол. США.

Витрати на виготовлення та монтаж

- Токарні та фрезерні роботи (виготовлення деталей) – 4 000 грн.
- Зварювальні роботи (рама, бункер) – 2 500 грн.
- Намотування котушки (оплата праці) – 2 000 грн.
- Складання та монтаж обладнання – 3 000 грн.
- Налаштування та калібрування системи керування – 4 000 грн.

					14.17 - КР.032.5.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 5	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.		Щербина І.І.						
Перевір.		Дядюра К.О.					83	10
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К. О.						

Разом роботи: $4\,000 + 2\,500 + 2\,000 + 3\,000 + 4\,000 = 15\,500$ грн.

Інші витрати

– Транспортно-заготівельні витрати (5% від вартості матеріалів) – $0,05 \times 26\,405 \approx 1\,320$ грн.

– Непередбачувані витрати (10% від суми матеріалів і робіт) – $0,10 \times (26\,405 + 15\,500) = 4\,190,5 \approx 4\,191$ грн.

Таблиця 5.1 – Розрахунок вартості матеріалів та комплектуючих

№	Найменування	Кількість	Ціна за од., грн	Сума, грн
1	Мідний емальований дріт ПЕТВ-2, Ø1,3 мм	25 кг	480	12 000
2	Каркас індуктора (склотекстоліт)	5 кг	250	1 250
3	Електротехнічна сталь для екрана (лист 1 мм)	15 кг	45	675
4	Конденсатори поліпропіленові 10 мкФ, 400 В	3 шт.	95	285
5	Мікроконтролер STM32F103C8T6 (готовий модуль)	1 шт.	320	320
6	Драйвер MOSFET IR2110	1 шт.	180	180
7	Транзистор IGBT IRG4PC50U	2 шт.	210	420
8	Діодний міст GBU808	1 шт.	95	95
9	Датчик Холла А1302 (з підсилювачем)	2 шт.	120	240
10	Трансформатор струму ТВК-2	1 шт.	150	150
11	Блок живлення 5 В / 24 В (готовий)	1 шт.	450	450
12	РК-дисплей 16×2	1 шт.	180	180
13	Вентилятор осьовий 120×120, 220 В	2 шт.	210	420
14	Електромагнітний вібратор (для живильника)	1 шт.	2 500	2 500
15	Профільна труба 40×40×2 (рама)	12 м	85	1 020
16	Нержавіюча сталь лист 1,5 мм (бункер, лоток)	8 кг	320	2 560
17	Пластик для лотка (антистатичний)	2 кг	120	240
18	Колеса (рояльні) діам. 150 мм	4 шт.	180	720
19	Кабелі, роз'єми, клеми, дрібні деталі	комплект	1 500	1 500
20	Захисний кожух (метал, фарбування)	1 шт.	1 200	1 200
	Разом матеріали			26 405

Загальна сума капітальних витрат (K_0)

$$K_0 = 26\,405 + 15\,500 + 1\,320 + 4\,191 = 47\,416 \text{ грн}$$

Округлено: **47 500 грн.**

Вартість серійного зразка (при виробництві 10–20 одиниць) може бути знижена до 30 000–35 000 грн за рахунок оптимізації конструкції та закупівлі комплектуючих оптом.

5.2 Визначення економічного ефекту за рахунок підвищення польової схожості та врожайності

Економічний ефект від впровадження пристрою базується на збільшенні врожайності сільськогосподарських культур внаслідок передпосівної магнітної активації насіння. Розрахунок виконано для озимої пшениці – однієї з основних культур в Україні.

Вихідні дані

– Площа посіву, що обробляється пристроєм (S) – 100 га (типове фермерське господарство).

– Норма висіву насіння пшениці – 180 кг/га (в середньому).

– Загальна потреба в насінні на 100 га:

$$Q_{seed} = 100 \cdot 180 = 18\,000 \text{ кг} = 18 \text{ т.}$$

– Вартість 1 тонни насіння (еліта) – 15 000 грн.

– Загальна вартість насіння: $15\,000 \cdot 18 = 270\,000$ грн.

– Базова врожайність (без обробки) – 45 ц/га.

– Ціна реалізації 1 т зерна пшениці – 5 500 грн (станом на 2026 рік, з урахуванням ПДВ).

Підвищення польової схожості та врожайності

Згідно з узагальненими даними (розділ 1), передпосівна обробка насіння низькочастотним магнітним полем забезпечує:

– підвищення польової схожості на 10–15%;

					14.17 - КР.032.5.000 ПЗ	Аркуш
						85
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– збільшення врожайності на 15–25% (в середньому 20%) при оптимальних режимах.

Приймаємо консервативне значення: приріст врожайності 15% (з урахуванням можливих коливань погодних умов).

Додаткова врожайність:

$$\Delta Y = 45 \cdot 0,15 = 6,75 \text{ ц/га}$$

Валовий збір додаткової продукції:

$$\Delta Q_{\text{grain}} = 6,75 \cdot 100 = 675 \text{ ц} = 67,5 \text{ т}$$

Вартість додаткової продукції

$$\Delta V = 67,5 \cdot 5\,500 = 371\,250 \text{ грн}$$

Економія насіннєвого матеріалу.

Підвищення польової схожості дозволяє зменшити норму висіву на 5–10% для досягнення тієї ж густоти стояння. Приймаємо економію насіння 5%:

$$\Delta Q_{\text{seed}} = 18\,000 \cdot 0,05 = 900 \text{ кг} = 0,9 \text{ т}$$

Економія коштів на насінні:

$$E_{\text{seed}} = 0,9 \cdot 15\,000 = 13\,500 \text{ грн}$$

Загальний річний економічний ефект (E)

$$E = \Delta V + E_{\text{seed}} = 371\,250 + 13\,500 = 384\,750 \text{ грн/рік}$$

Додаткові ефекти

– Зменшення витрат на гербіциди та фунгіциди через більш стійкі рослини (орієнтовно 5–10%). Для спрощення цей ефект не враховуємо, що робить розрахунок консервативним.

– Підвищення якості зерна (вміст білка, клейковини) може дати додаткову надбавку до ціни 50–100 грн/т. При 675 т додаткового зерна це складе до 67 500 грн, але не враховуємо через нестабільність.

					14.17 - КР.032.5.000 ПЗ	Аркуш
						86
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5.3 Розрахунок показників економічної ефективності та терміну окупності проєкту

Простий термін окупності (PP)

Простий термін окупності капітальних вкладень:

$$PP = \frac{K_0}{E} = \frac{47\,500}{384\,750} \approx 0,123 \text{ року}$$

$$0,123 \text{ року} = 0,123 \times 365 \approx 45 \text{ днів}$$

Термін окупності становить близько 1,5 місяця, що є надзвичайно низьким показником, характерним для високоефективних агротехнологій.

Чистий дисконтований дохід (NPV) за 5 років

Для більш точної оцінки використаємо метод дисконтування грошових потоків. Прийmemo:

- горизонт розрахунку $T = 5$ років (типовий строк служби електронних компонентів);
- ставка дисконту $r = 10\%$ (0,10) – ураховує інфляцію та альтернативну вартість капіталу;
- грошовий потік (економія) щорічно однаковий – 384 750 грн (без зростання).
- Дисконтовані грошові потоки:

$$PV = \sum_{t=1}^5 \frac{E}{(1+r)^t} = E \cdot \sum_{t=1}^5 \frac{1}{(1,1)^t} \quad (5.1)$$

Сума дисконтних множників:

$$\begin{aligned} \sum_{t=1}^5 \frac{1}{1,1^t} &= \frac{1}{1,1} + \frac{1}{1,21} + \frac{1}{1,331} + \frac{1}{1,4641} + \frac{1}{1,61051} \\ &= 0,9091 + 0,8264 + 0,7513 + 0,6830 + 0,6209 = 3,7907 \\ PV &= 384\,750 \cdot 3,7907 \approx 1\,458\,500 \text{ грн} \end{aligned}$$

Чиста приведена вартість (NPV):

$$NPV = PV - K_0 = 1\,458\,500 - 47\,500 = 1\,411\,000 \text{ грн}$$

					14.17 - КР.032.5.000 ПЗ	Аркуш
						87
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

NPV значно більший за нуль, проєкт є економічно доцільним.

Індекс рентабельності інвестицій (PI)

$$PI = \frac{PV}{K_0} = \frac{1\,458\,500}{47\,500} \approx 30,7$$

Це означає, що на кожен гривню вкладених коштів отримується 30,7 гривні приведенного доходу.

Внутрішня норма рентабельності (IRR)

IRR – це ставка дисконту, при якій NPV = 0. Оскільки PV при r=10% значно перевищує K₀, IRR буде дуже високою (понад 200%). Для орієнтування: при r=200% (2,0) сума дисконтних множників за 5 років ≈ 1,0, NPV ≈ 384 750 – 47 500 ≈ 337 250 > 0. Отже, IRR > 200%, що значно перевищує типову вартість капіталу (10–15%).

Аналіз чутливості

Розглянемо песимістичний сценарій:

- приріст врожайності не 15%, а 8%;
- ціна зерна знижена до 5 000 грн/т;
- зменшення економії насіння вдвічі (6 750 грн).

Розрахунок:

Додаткова врожайність: $45 \cdot 0,08 = 3,6$ ц/га → 360 ц = 36 т на 100 га.

Вартість: $36 \cdot 5\,000 = 180\,000$ грн.

Економія насіння: 6 750 грн.

Разом економія: 186 750 грн.

Термін окупності: $47\,500 / 186\,750 \approx 0,254$ року = 93 дні (близько 3 місяців). Навіть у песимістичному варіанті окупність менше одного сезону.

Розрахунок річного чистого прибутку

Для оцінки прибутку від впровадження необхідно врахувати амортизацію обладнання (приймаємо 20% на рік для електроніки та механічних частин) та витрати на електроенергію.

- Амортизація (А): $0,20 \cdot 47\,500 = 9\,500$ грн/рік.

					14.17 - КР.032.5.000 ПЗ	Аркуш
						88
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Витрати електроенергії: потужність 300 Вт, час роботи для обробки 18 т насіння при продуктивності 100 кг/год – 180 год. Спожита електроенергія: $0,3 \text{ кВт} \cdot 180 = 54 \text{ кВт} \cdot \text{год}$. Вартість електроенергії (6,5 грн/кВт·год): $54 \cdot 6,5 \approx 350 \text{ грн}$.

– Поточний ремонт та технічне обслуговування (2% від капітальних витрат): $0,02 \cdot 47\,500 = 950 \text{ грн}$.

– Річні експлуатаційні витрати: $9\,500 + 350 + 950 = 10\,800 \text{ грн}$.

Чистий річний прибуток:

$$P = E - 10\,800 = 384\,750 - 10\,800 = 373\,950 \text{ грн/рік}$$

З урахуванням податку на прибуток (18%):

$$P_{net} = 373\,950 \cdot (1 - 0,18) = 373\,950 \cdot 0,82 \approx 306\,639 \text{ грн/рік}$$

Термін окупності з урахуванням податків:

$$PP_{net} = \frac{47\,500}{306\,639} \approx 0,155 \text{ року} \approx 56 \text{ днів}$$

Економічна ефективність на 1 гривню витрат

Витрати на обробку 1 тонни насіння:

– Амортизація на 1 т: $9\,500/18 = 528 \text{ грн/т}$.

– Електроенергія: $350/18 \approx 19 \text{ грн/т}$.

– Ремонт: $950/18 \approx 53 \text{ грн/т}$.

– Разом: 600 грн/т.

Вартість додаткової продукції з 1 га: 3 712,5 грн (при врожайності +6,75 ц/га). При нормі висіву 180 кг/га витрати на обробку насіння на 1 га: $600 \cdot 0,18 = 108 \text{ грн}$. Співвідношення вигоди до витрат: $3\,712,5/108 \approx 34,4$ рази.

Отримані результати підтверджують доцільність впровадження пристрою в сільськогосподарське виробництво з метою підвищення врожайності, зменшення витрат на насіння та отримання значного економічного ефекту.

					14.17 - КР.032.5.000 ПЗ	Аркуш
						89
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

1. Капітальні витрати на виготовлення дослідного зразка пристрою магнітної активації насіння становлять 47 500 грн, що є доступним для невеликих фермерських господарств.

2. Річний економічний ефект від впровадження пристрою на площі 100 га озимої пшениці (при збільшенні врожайності на 15%) складає 384 750 грн, включаючи додаткову вартість зерна та економію насіннєвого матеріалу.

3. Простий термін окупності капітальних вкладень становить близько 1,5 місяця (45 днів). Навіть при песимістичному сценарії (приріст врожайності 8%) окупність не перевищує 3 місяців.

4. Чиста приведена вартість (NPV) за 5 років при ставці дисконту 10% дорівнює 1 411 000 грн, індекс рентабельності $PI = 30,7$. Внутрішня норма рентабельності перевищує 200%.

5. З урахуванням амортизації, електроенергії та податків чистий річний прибуток становить 306 639 грн, а скоригований термін окупності – 56 днів.

6. Економічна ефективність на 1 гривню витрат на обробку насіння досягає 34,4 раза, що робить проєкт надзвичайно вигідним для впровадження в сільськогосподарських підприємствах різного масштабу.

Рекомендується виготовити дослідний зразок, провести польові випробування на різних культурах (пшениця, ячмінь, кукурудза, соя) для уточнення економічних показників та подальшого серійного виробництва.

					14.17 - КР.032.5.000 ПЗ	Аркуш
						90
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-технічне завдання – підвищення ефективності передпосівної підготовки насіння шляхом розробки пристрою для біологічної активації низькочастотним магнітним полем. На основі проведених досліджень, теоретичних розрахунків, інженерного проектування та техніко-економічного аналізу сформульовано наступні основні висновки:

1. Аналіз стану питання. Встановлено, що низькочастотне магнітне поле є ефективним біофізичним фактором впливу на насіння. Основними механізмами дії є: іонні ефекти (підвищення проникності мембран), активація антиоксидантної системи (підвищення стресостійкості), модуляція експресії генів (активація клітинного циклу та синтезу фітогормонів), а також позитивний вплив на фотосинтетичний апарат. Оптимальні параметри обробки: магнітна індукція 10–100 мТл, частота 20–100 Гц, час експозиції 5–30 с, що забезпечує підвищення схожості на 30–35% та врожайності на 20–25%. Проведено класифікацію пристроїв за типом поля (статичне, змінне, імпульсне) та способом організації процесу (періодичні, безперервні). Найбільш перспективними для промислового впровадження є потокові установки з вібраційним дозуванням. Виявлено основні проблеми енергоефективності та стабільності: коливання напруги живлення ($\pm 10\text{--}15\%$), температурний дрейф опору (до $\pm 20\%$), нерівномірність поля (CV до 20–30%), що потребує застосування систем стабілізації та екранування.

2. Теоретичне обґрунтування параметрів. Розроблено математичну модель розподілу магнітної індукції в робочій камері індуктора.. Для запобігання розстроюванню резонансної частоти запропоновано автоматичне підлаштування частоти (AFT) або відмову від резонансу.

		3.			14.17 - КР.032.0.000 ПЗ													
Зм.	Арк.	4.	№ докум.	Підпис	Дата													
Розроб.		Щербина І.І.				ВИСНОВКИ					Літ.		Аркуш		Аркушів			
Перевір.		Дядюра К.О.													91		3	
Реценз.																		
Н. Контр.																		
Затверд.		Дядюра К.О.																

5. Кінематичний аналіз показав, що при вібраційному транспортуванні насіння у вигляді моношару швидкість руху регулюється в межах 0,01–0,25 м/с, що забезпечує час експозиції 1,6–40 с при довжині котушки 0,4 м. Продуктивність для пшениці при ширині лотка 0,1 м становить 50–100 кг/год.

6. Інженерний розрахунок та проектування (розділ 3). Виконано електротехнічний розрахунок індуктора: кількість витків $N = 4000$, провід ПЕТВ-2 Ø1,3 мм, активний опір $R = 22,7$ Ом, індуктивність $L = 0,45$ Гн, індуктивний опір $X_L = 141$ Ом. Для живлення від мережі 220 В, 50 Гц обрано часткову компенсацію з конденсатором $C = 30$ мкФ, що дозволяє отримати струм 5 А та магнітну індукцію 50 мТл. Розроблено принципову електричну схему генератора на базі мікроконтролера STM32F103 з ШІМ-керуванням, датчиками струму та Холла, ПІД-регулюванням, захистом від перегріву та перевантажень. Спроековано механічну частину: бункер об'ємом 0,15 м³ (кут нахилу стінок $\geq 60^\circ$), вібраційний дозатор (лоток 100×400 мм, регульована частота 20–150 Гц), каркас індуктора зі склотекстоліту, транспортна рама. Виконано 3D-модельовання в SolidWorks, габаритні розміри 1200×600×1500 мм, маса ≈ 65 кг, споживана потужність до 300 Вт. Результати FEM-аналізу рами підтвердили її міцність (максимальне напруження 80 МПа < 235 МПа).

7. Охорона праці та безпека життєдіяльності (розділ 4). Проаналізовано небезпечні фактори: електричний струм (220 В, до 10 А), електромагнітне поле (до 100 мТл, за межами установки – до 0,5 мТл), пожежна небезпека (нагрівання обмотки до 567 Вт), шум (до 75 дБА), органічний пил. Розраховано заземлення: опір одиничного вертикального заземлювача 33,7 Ом, контуру з трьох труб – 15 Ом; рекомендовано використовувати природний заземлювач. Для захисту від ЕМП застосовано екран з листової електротехнічної сталі (товщина 1 мм) з коефіцієнтом екранування 20–50, що знижує індукцію на робочому місці до 0,01–0,025 мТл (нижче допустимого рівня 0,05 мТл). Розроблено інструкцію з техніки безпеки: допуск осіб не молодше 18 років, II група з електробезпеки, перелік ЗІЗ (респіратор FFP2, окуляри, діелектричне взуття), правила роботи та дії в аварійних ситуаціях.

					14.17 - КР.032.5.000 ПЗ	Аркуш
						92
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

8. Техніко-економічне обґрунтування (розділ 5). Капітальні витрати на виготовлення дослідного зразка становлять 47 500 грн. Річний економічний ефект від впровадження пристрою на площі 100 га озимої пшениці (при підвищенні врожайності на 15% та економії насіння 5%) дорівнює 384 750 грн. Простий термін окупності капітальних вкладень – 45 днів ($\approx 1,5$ місяця). При песимістичному сценарії (приріст врожайності 8%) окупність не перевищує 3 місяців. Чиста приведена вартість (NPV) за 5 років при ставці дисконту 10% становить 1 411 000 грн, індекс рентабельності $PI = 30,7$, внутрішня норма рентабельності $IRR > 200\%$. З урахуванням амортизації, електроенергії та податку на прибуток чистий річний прибуток – 306 639 грн, скоригований термін окупності – 56 днів. Економічна ефективність на 1 гривню витрат на обробку насіння досягає 34,4 рази.

9. Наукова новизна та практичне значення. Наукова новизна полягає у розробці математичної моделі розподілу магнітної індукції в робочій камері індуктора для потокової обробки насіння; в обґрунтуванні нерезонансного режиму зі стабілізацією струму та ПД-регулюванням, що забезпечує похибку $B \pm 2-3\%$; у визначенні кінематичних залежностей для вібраційного транспортування насіння в зоні магнітного поля. Практичне значення полягає у створенні дослідного зразка пристрою з продуктивністю 50–100 кг/год, споживаною потужністю до 300 Вт, габаритами 1200×600×1500 мм, масою 65 кг. Розроблена конструкція може бути використана в господарствах різного масштабу для передпосівної обробки насіння пшениці, ячменю, кукурудзи, сої, ріпаку. Методичні матеріали можуть бути застосовані в навчальному процесі при підготовці інженерів за спеціальністю 208 «Агроінженерія».

					14.17 - КР.032.5.000 ПЗ	Аркуш
						93
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Базилевич М. Є., Грицаєнко В. С. Біофізика сільськогосподарських культур: вплив електромагнітних полів на рослинні організми. Київ: Аграрна наука, 2021. 248 с.
2. Блехман І. І. Вібраційна механіка. Київ: Наукова думка, 2018. 512 с.
3. Гончаренко А. В., Коваленко В. П. Магнітна активація насіння зернових культур: теорія та практика. Харків: ХНТУСГ, 2022. 176 с.
4. ДСТУ ISO 12100:2016. Безпека машин. Основні принципи проектування. Оцінювання ризику та зменшення ризику. Київ: УкрНДНЦ, 2016. 98 с.
5. ДСанПіН 3.3.2.007-98. Державні санітарні норми і правила захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань. Київ: МОЗ України, 1998. 45 с.
6. Кіндрат О. О., Тишковець В. І. Електромагнітні технології в агропромисловому комплексі: монографія. Львів: Новий світ, 2019. 324 с.
7. Курзін В. В., Шульга С. В. Енергоефективність пристроїв для передпосівної обробки насіння. *Вісник аграрної науки*. 2021. № 7. С. 52–58.
8. Мартинов В. В., Петренко І. М. Вібраційні живильники для сипких матеріалів: розрахунок та проектування. Дніпро: Січ, 2020. 168 с.
9. Морозов М. І., Савченко О. П. Математичне моделювання електромагнітних систем агротехнологій. Вінниця: ВНТУ, 2021. 200 с.
10. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні. Київ: МНС України, 2014. 187 с.
11. НПАОП 0.00-1.01-10. Правила охорони праці під час експлуатації електроустановок. Київ: Держгірпромнагляд, 2010. 132 с.

					14.17 - КР.032.0.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ			
Розроб.		Щербина І.І.						
Перевір.		Дядюра К.О.						
Реценз.								
Н. Контр.								
Затверд.		Дядюра К.О.						
					Літ.	Аркуш	Аркушів	
						94	2	

12. Олійник В. С., Соколова І. В. Біологічна дія низькочастотного магнітного поля на рослини. *Фізіологія рослин*. 2022. Т. 69, № 3. С. 231–240.
13. Петриченко В. Ф., Лихочвор В. В. Рослинництво: технології вирощування зернових культур. Львів: Українські технології, 2020. 416 с.
14. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). 7-ме вид. Харків: Фактор, 2015. 736 с.
15. Романюк М. О., Шевченко І. В. Основи електробезпеки в агроінженерії. Житомир: Полісся, 2021. 192 с.
16. Савченко Ю. Г., Черненко В. М. Економічне обґрунтування інноваційних агротехнологій. Київ: КНЕУ, 2019. 248 с.
17. Ткачук М. М., Коваль О. В. Охорона праці в агропромисловому комплексі. Дніпро: Січ, 2022. 304 с.
18. Федоренко В. І., Захарченко М. А. Біофізичні основи стимуляції росту рослин електромагнітним полем. *Біофізичний вісник*. 2020. Вип. 44. С. 32–40.
19. Шевченко О. Г., Лавренко М. М. Проектування електромагнітних систем з використанням методу скінченних елементів. Харків: НТУ «ХПІ», 2021. 156 с.
20. Bastos J. P. A., Sadowski N. Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods. New York: CRC Press, 2003. 509 p.
21. Martinez E., Florez A., Garcia P. Design of a low-frequency magnetic field generator for seed germination improvement. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. Vol. 162. P. 118–125.
22. Neamțu S., Moraru C., Bădescu M. Automatic control system for magnetic seed treatment equipment. *Acta Technica Napocensis – Series: Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering*. 2018. Vol. 61, № 4. P. 527–534.
23. Ziętek P., Pietruszewski S., Koper R. Influence of vibration frequency on seed flow rate in electromagnetic seed treater. *International Agrophysics*. 2017. Vol. 31, № 2. P. 267–272.

					14.17 - КР.032.5.000 ПЗ	Аркуш
						95
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		