

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

### Розробка пристрою живлення та керування електромагнітним пресом з підвищеними енергетичними характеристиками

Назва теми

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Шифр, назва

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Шифр, назва

Освітня програма «Електропобутова техніка»

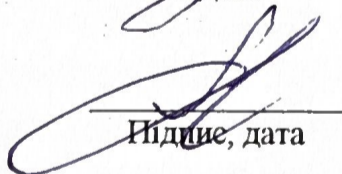
Шифр МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 2 курсу  
група ЕТм-24-1

  
Підпис

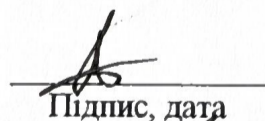
Волкотруб Р.О.  
Ініціали, прізвище

Керівник

  
Підпис, дата

проф. Поліщук О.С.  
Ініціали, прізвище

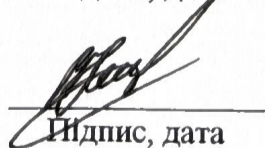
Нормоконтролер

  
Підпис, дата

С.І. Пуховик  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри МАЕЕС

  
Підпис, дата

доц. Неймак В.С.  
Ініціали, прізвище

10 12 2025 р.

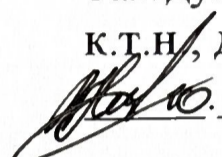
# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту і архітектури  
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем  
Освітній рівень магістр  
Галузь знань 14 «Електрична інженерія»  
Шифр і назва  
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
Шифр і назва  
Освітня програма «Електропобутова техніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

к.т.н., доц. Неймак В.С.

 12 .2025р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Волкотруб Роман Олександрович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка пристрою живлення та керування електромагнітним пресом з підвищеними енергетичними характеристиками

керівник роботи проф. Поліщук О.С.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 25 08 2025 р. № 65

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 10.12.2025р

3. Вихідні дані до роботи Технічні характеристики електромагнітного пресу з підвищеними енергетичними характеристиками

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1. Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи. 2. Розробка пристрою живлення та керування електромагнітним пресом з підвищеними енергетичними характеристиками.

3. Розрахунок елементів пристрою живлення та керування електромагнітним пресом. Висновки. Перелік джерел посилання.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) Аркуш 1. Електромагніт. Документ оглядовий (A1). Аркуш 2. Схеми керування ЛЕМД. Документ оглядовий (A1). Аркуш 3. Пристрій живлення та керування. Схема структурна (A1). Аркуш 4. Електромагнітний прес з утримувачем. Документ ілюстраційний (A1). Аркуш 5. Блок живлення та керування електромагнітним пресом. Схема комбінована функціональна (A1). Аркуш 6. Блок живлення і керування електромагнітним пресом. Документ ілюстраційний (A1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

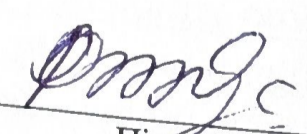
7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

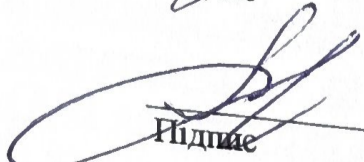
Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи	до 28.10.24р.	
2. Розробка пристрою живлення та керування електромагнітним пресом з підвищеними енергетичними характеристиками	до 15.11.24р.	
3. Розрахунок елементів пристрою живлення та керування електромагнітним пресом	до 17.11.24р.	
4. Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу	до 12.12.24р.	

Студент

Керівник роботи

  
Підпис

Р.О. Волкотруб  
Ініціали, прізвище

  
Підпис

О.С. Поліщук  
Ініціали, прізвище

# АНОТАЦІЯ

до магістерської роботи студента  
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка».

1. Прізвище, ім'я та по батькові Волкотруб Роман Олександрович

2. Тема магістерської роботи Розробка пристрою живлення та керування електромагнітним пресом з підвищеними енергетичними характеристиками

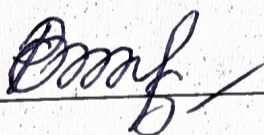
3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента \_\_\_\_\_

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 6 арк., сторінок записки 62

5. Сучасні системи живлення та керування електромагнітними пресами, попри їхні широкі функціональні можливості, часто характеризуються складною схемною реалізацією та високою вартістю, що обмежує їх використання на малих і середніх підприємствах. Водночас спрощені або застарілі рішення не забезпечують достатньої точності та гнучкості керування ударним процесом. Тому актуальним є створення технічно простих і надійних пристроїв живлення та керування, здатних реалізувати режим статичного індуктивного накопичення енергії та забезпечити ефективну роботу лінійних електромагнітних двигунів. Розробка такого пристрою є важливою науково-технічною задачею, зумовленою потребами модернізації обладнання, підвищення енергоефективності та доступності сучасних рішень для підприємств легкої промисловості.

В магістерській роботі розроблено пристрій живлення та керування електромагнітним пресом з підвищеними енергетичними характеристиками. В першому розділі зроблено огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи. В другому здійснено розробку пристрою живлення та керування електромагнітним пресом з підвищеними енергетичними характеристиками. В третьому розділі виконано розрахунок елементів пристрою живлення та керування електромагнітним пресом.

Підпис студента



" 10 " 12 20 25 р.

## РІШЕННЯ ЕК:

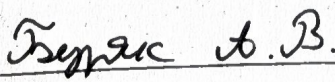
Протокол 1 від " 18 " 12 20 25 р.

Оцінка проекту ЕК 9,5/10

Рекомендації ЕК -

Особливі відмітки -

Технічний секретар

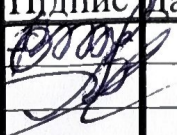
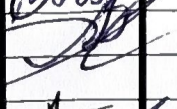
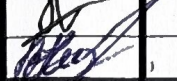
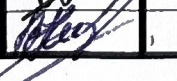


" 18 " 12 20 25 р.

## ЗМІСТ

		стор.
	Вступ	6
1	Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи	8
1.1	Принципи функціонування електромагнітних виконавчих механізмів ударної дії	8
1.2	Огляд патентів конструкцій лінійних електромагнітних двигунів та шляхів підвищення ефективності їх використання	10
1.3	Огляд сенсорів і систем зворотного зв'язку для керування ударним приводом	18
1.4	Сучасні системи керування імпульсними електромагнітними приводами	20
1.5	Огляд блоків керування лінійним електромагнітним двигуном з електромагнітним утримуванням якоря	22
<del>1.6</del>	Висновки до першого розділу	28
2	Розробка пристрою живлення та керування електромагнітним пресом з підвищеними енергетичними характеристиками	30
2.1	Обґрунтування вибору конструктивної схеми пристрою живлення та керування електромагнітним пресом з електромагнітним утримувачем	30
2.2	Розробка структурної схеми пристрою живлення та керування електромагнітним пресом з електромагнітним утримувачем	32
2.3	Опис конструкції електромагнітного пресу з підвищеними енергетичними характеристиками	34

MPMA25.00.00.000 ПЗ

Зм.	Арк.	Нодокум.	Підпис	Дата				
Виконав		Волкотруб			Розробка пристрою живлення та керування електромагнітним пресом з підвищеними енергетичними характеристиками Пояснювальна записка	Літера	Аркуш	Аркушів
Перевір.		Поліщук				М	4	62
Н.контр.		Поліщук			ХНУ гр.ЕТМ-24-1			
Затвер.		Неймак						



2.4	Принцип роботи пресового обладнання з підвищеними енергетичними характеристиками	37
2.5	Розробка пристрою живлення та керування пресового обладнання з ЛЕМД із електромагнітним утримувачем	38
2.6	Загальний вигляд пристрою живлення та керування електромагнітним пресом з електромагнітним утримувачем	42
2.7	Висновки до другого розділу	43
3	Розрахунок елементів пристрою живлення та керування електромагнітним пресом	45
3.1	Вихідні дані для розрахунків	45
3.2	Розрахунок силового трансформатора	46
3.3	Розрахунок і вибір діодних мостів	49
3.4	Розрахунок резистора у колі реле струму	51
3.5	Вибір реле та комутаційних контактів	52
3.6	Вибір мережевого запобіжника та вимикача	53
3.7	Оцінка енергетичних параметрів ЛЕМД	53
3.8	Узагальнення результатів розрахунку	54
3.9	Висновки до третього розділу	55
	Висновки	58
	Перелік джерел посилання	59
	Додаток А	

## ВСТУП

Сучасні тенденції розвитку обладнання ударної дії для легкої промисловості та суміжних галузей пов'язані з переходом до високошвидкісних, енергоефективних та технологічно гнучких систем приводу [1-3]. Зростання вимог до продуктивності, точності та стабільності технологічних процесів, зокрема у взуттєвому, швейному, поліграфічному та пакувальному виробництві, зумовлює необхідність застосування принципово нових механізмів формування ударного зусилля. На відміну від традиційних механічних, гідравлічних і пневматичних пресів, електромагнітні приводи забезпечують пряме перетворення електричної енергії у кінетичну без проміжних механічних елементів, що істотно зменшує інерційність та виключає втрати на тертя й зношування. Це дозволяє реалізовувати ударні режими з високою частотою повторення, точно керувати енергетичним профілем імпульсу та забезпечувати мінімальні експлуатаційні витрати.

Особливої актуальності у таких системах набувають лінійні електромагнітні двигуни (ЛЕМД), здатні працювати в режимі статичного індуктивного накопичення енергії. Цей режим забезпечує суттєве збільшення початкової сили тяги та енергії удару завдяки попередньому нарощуванню струму в обмотці при утримуванні якоря в фіксованому положенні. Переваги ЛЕМД полягають у високій швидкодії, відсутності складної кінематичної трансмісії, можливості тонкого регулювання параметрів ударного впливу та компактності конструкції. Це робить їх перспективною основою для пресового обладнання нового покоління, здатного забезпечити якісне вирубування матеріалів різної твердості без використання громіздких механічних приводів.

Ефективність роботи таких пресових систем визначається не лише конструкцією ЛЕМД, а передусім якістю та функціональними можливостями системи живлення і керування. Саме ці елементи забезпечують кероване нарощування струму, синхронізацію роботи силових електромагнітів, формування моменту відривання якоря, реалізацію захисних алгоритмів і стабільність ударних імпульсів.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Недостатня точність керування або неправильний вибір схемних рішень може призвести до спотворення енергетичного профілю удару, перевантажень обмоток, нестабільності процесу вирубування та зменшення ресурсу механічних елементів пресу. Тому питання розроблення оптимальної системи живлення та керування, адаптованої саме до роботи в імпульсному режимі, має ключове значення.

З огляду на це виникає потреба у створенні спеціалізованого пристрою живлення та керування, здатного забезпечити раціональний режим роботи ЛЕМД і електромагнітного утримувача, а також гарантувати високу повторюваність ударних імпульсів у компактній, надійній та безпечній конструкції. Такий пристрій повинен реалізовувати контроль струму в обмотках, формувати керовані часові затримки, здійснювати логічне керування робочим циклом, забезпечувати багаторівневий електричний захист та стабільну взаємодію з датчиками положення. Додатковою вимогою є можливість регулювання енергетичних характеристик удару шляхом зміни уставок струмових та часових реле, що дозволяє адаптувати роботу обладнання до різних матеріалів та умов технологічного процесу.

Метою магістерської роботи є розробка пристрою живлення і керування пресовим обладнанням з підвищеними енергетичними характеристиками, що працює на основі лінійного електромагнітного двигуна з електромагнітним утримувачем.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

# 1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ З ТЕМАТИКИ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

## 1.1 Принципи функціонування електромагнітних виконавчих механізмів ударної дії

Електромагнітні виконавчі механізми ударної дії належать до класу пристроїв, у яких робочий імпульс формується за рахунок перетворення електричної енергії в кінетичну енергію поступального руху якоря [4-6]. На відміну від традиційних механічних або гідропневматичних ударних систем, електромагнітні механізми забезпечують прямолінійне збурення без проміжних кінематичних передач, що суттєво підвищує їхню швидкість, точність і енергоефективність. Робота таких механізмів ґрунтується на взаємодії магнітного поля, яке створюється в обмотці, та феромагнітного рухомого елемента, який виконує ударну дію.

Базовим елементом електромагнітних виконавчих механізмів є магнітна система, що складається з магнітопроводу, обмотки збудження та рухомого якоря. При подачі струму на обмотку у магнітопроводі формується магнітний потік, який створює електромагнітну силу, спрямовану на зменшення повітряного зазору між нерухомою та рухомою частинами. Рухома частина (якір) під дією цієї сили здійснює прискорений поступальний рух у напрямку мінімального магнітного опору, перетворюючи потенційну енергію магнітного поля в кінетичну енергію удару. У момент контакту з робочим органом (різаком, штампом або бойком) акумульована кінетична енергія передається технологічному матеріалу, забезпечуючи виконання необхідної операції.

Формування ударної дії у електромагнітних механізмах залежить від динаміки зміни магнітного поля, індуктивності обмотки, швидкості росту струму та конструктивних параметрів магнітопроводу [4-6]. Оскільки електромагнітна сила пропорційна квадрату магнітної індукції, а та, у свою чергу, визначається струмом, одним із ключових факторів є швидкість наростання струму в обмотці. На

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

відміну від механічних систем, у яких зусилля обмежується масою маховика або тиском у гідростатичному приводі, в електромагнітних виконавчих пристроях сила може змінюватися в широкому діапазоні в залежності від керування струмом.

Для забезпечення високої енергії удару електромагнітні системи використовують режим так званого статичного індуктивного накопичення, коли якорі утримується у фіксованому положенні до накопичення у котушці достатнього рівня магнітної енергії. У цей момент електромагніт працює як індуктивний накопичувач: струм зростає при нерухомому якорі, і магнітна енергія поступово накопичується в магнітному ланцюзі. Коли утримуюча сила усувається, відбувається різкий перехід енергії у кінетичний рух, що забезпечує значно більшу швидкість та силу удару порівняно зі стандартними режимами.

Особливістю електромагнітних виконавчих механізмів ударної дії є високий ступінь керованості силовими параметрами. Зміна напруги, струму, тривалості імпульсу або форми сигналу дає змогу регулювати силу удару, швидкість руху та момент початку ходу. Це створює переваги перед механічними пресами, робота яких визначається фіксованими характеристиками кінематичної передачі або тиском у гідроприводі. Електромагнітні приводи можна адаптувати до конкретного матеріалу, ступеня його жорсткості, товщини та необхідних технологічних умов, забезпечуючи оптимальну якість обробки.

Важливою складовою роботи електромагнітних ударних систем є повернення якоря після завершення робочого циклу. Найчастіше для цього використовують пружинні елементи, які стискаються під час руху якоря і повертають його у вихідне положення після закінчення удару. Це забезпечує циклічність роботи, спрощує конструкцію та мінімізує енергоспоживання в режимах холостого ходу, оскільки електромагніт активується лише на короткий проміжок часу, необхідний для формування ударного імпульсу.

Крім того, у сучасних електромагнітних виконавчих механізмах ударної дії широко використовуються електронні системи керування [7], що дозволяють

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

здійснювати точний контроль параметрів магнітного поля, обмеження струму, захист від перегріву та керування частотою ударних циклів. Інтеграція з мікроконтролерними або DSP-модулями забезпечує формування складних профілів струму, синхронізацію роботи кількох обмоток та адаптивне регулювання режимів пресового обладнання в реальному часі.

Таким чином, принцип роботи електромагнітних виконавчих механізмів ударної дії базується на ефективному перетворенні магнітної енергії в кінетичну, високій швидкодії, можливості накопичення енергії в індуктивних елементах та широких можливостях керування силовими параметрами. Завдяки цим перевагам електромагнітні приводи є перспективною основою для створення вискоефективного пресового обладнання з підвищеними енергетичними характеристиками [4].

## 1.2 Огляд патентів конструкцій лінійних електромагнітних двигунів та шляхів підвищення ефективності їх використання

Підвищення енергії удару, швидкості руху якоря та коефіцієнта корисної дії лінійних електромагнітних двигунів (ЛЕМД) є одним із ключових напрямів розвитку електромагнітних виконавчих механізмів ударної дії. У низці патентних розробок запропоновано різні конструктивні рішення, спрямовані на збільшення тягового зусилля, ефективніше використання магнітного поля, акумулювання енергії в гідравлічних або електромагнітних ланках, а також на кероване формування силового імпульсу. Нижче наведено огляд найбільш характерних конструкцій ЛЕМД та електромагнітних пресів, що реалізують ці підходи.

Одним із підходів до підвищення ефективності ЛЕМД є поєднання електромагнітного і гідравлічного підсилення зусилля. У відомій конструкції [8] лінійний електромагнітний двигун оснащено додатковим якорем у вигляді циліндричного осердя з наскрізним центральним отвором і плоским диском на його торці. Додатковий якір змонтовано в отворі немагнітної направляючої втулки з можли-

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

вістю зустрічного переміщення відносно основного якоря, а між торцями цих осердів утворена гідравлічна камера, заповнена рідиною. Шток розміщений в осьовому отворі додаткового якоря, а між його буртом і корпусом встановлено пружину. Таке компонування дозволяє перетворити відносне переміщення якорів на тиск робочої рідини та створити додаткове гідравлічне підсилення удару.

Конструкція електромагнітного пресу, представлена на листі [МРМА25.00.00.000ДО1] та рис. 1.1, містить корпус 1 і розміщений на ньому циліндричний електромагніт з немагнітною направляючою втулкою 2, обмоткою збудження 3 та зовнішнім магнітопроводом 4. В направляючій втулці з можливістю осьового переміщення встановлено два якорі: основний (циліндричне осердя 5 з плоским диском 6) та додатковий (осердя 7 з диском 8). У додатковому якорі виконано наскрізний осьовий отвір, у якому розміщений шток 9, підтиснутий через бурт пружиною 10. Торці електромагніта закриті немагнітними кришками 11 і 12, між осердями 5 та 7 утворена гідравлічна камера 13, а в осерді 7 виконана камера 14 меншого перерізу, що фактично формує робочу гідравлічну камеру преса.

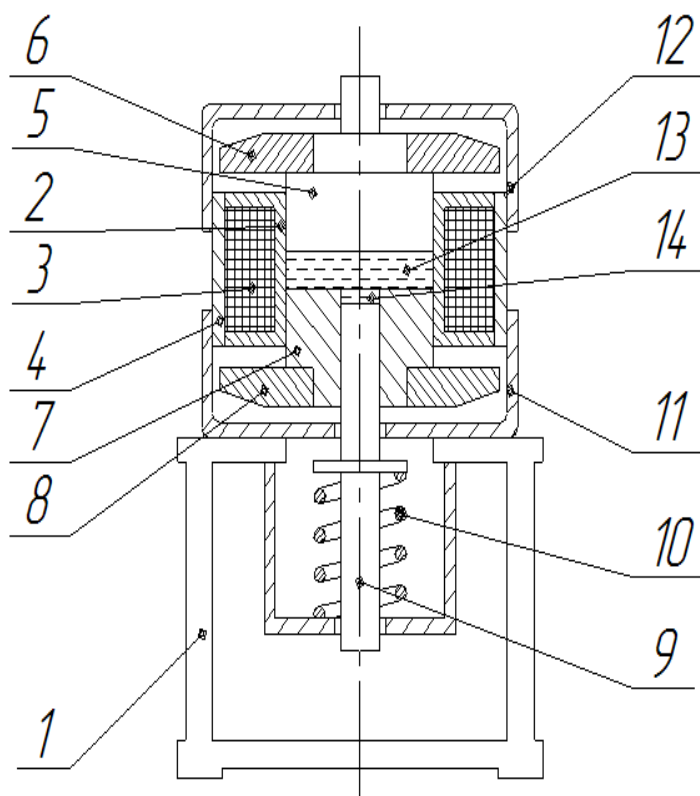


Рисунок 1.1 – Електромагнітний прес з центральним наскрізним

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА25.00.00.000 ПЗ

Арк.  
11

отвором і плоским диском на його торці та якорем додатковим у вигляді циліндричного осердя

Електромагнітний прес за цією схемою працює так. При подачі імпульсу напруги на обмотку 3 виникає тягове зусилля, обумовлене сумарною дією магнітних потоків у робочих зазорах між торцями осердь 5 і 7, між торцями магнітопроводу 4 та дисків 6 і 8, а також взаємодією струму котушки з потоками розсіяння між магнітопроводом 4 та осердями 5 і 7. Під дією цієї сили обидва якорі переміщуються в напрямку втулки 2, стискаючи робочу рідину в камері 13. Рідина перетікає в камеру 14, переміщуючи шток 9, який, стискаючи пружину 10, передає зусилля на об'єкт обробки. Після відключення струму пружина 10 повертає шток у вихідне положення, а за ним – і якорі. Таким чином поєднується електромагнітне формування зусилля з гідравлічним підсиленням і згладжуванням удару.

Подальший розвиток ідей підвищення енергії удару пов'язаний із використанням короткозамкнених елементів та спеціальної організації магнітного поля. В іншому варіанті електромагнітного пресу (рис. 1.2) ЛЕМД оснащено короткозамкненим кільцем і магнітопровідним кільцевим полюсом [9].

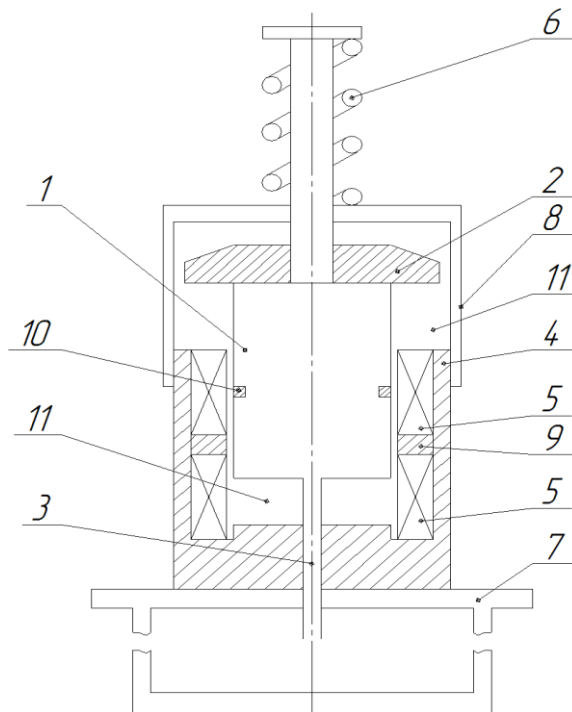


Рисунок 1.2 – Електромагнітний прес з короткозамкненим кільцем та магнітопровідним кільцевим полюсом

На боковій поверхні якоря 1 на певній відстані від дискової частини 2 (приблизно на половині довжини якоря) виконано кільцеву канавку, у якій розташоване короткозамкнене електропровідне кільце 10. Обмотка електромагніта 5 виконана двосекційною, а магнітопровідний кільцевий полюс 9 змонтований між секціями обмотки в зоні розміщення кільця у притягнутому положенні якоря. До складу конструкції входять також направляючий стержень 3, зворотна пружина 6, статор 4, станина 7 та направляючий корпус 8.

У процесі роботи при подачі імпульсу напруги на обмотку 5 яркір 1 переміщується вниз, здійснюючи робочий хід. Тягове зусилля формується за рахунок магнітних потоків у верхньому та нижньому робочих зазорах 11 між якорем і статором, а також за рахунок взаємодії струму в обмотці 5 із магнітним потоком  $\Phi$ , що виходить з бокової поверхні якоря в зоні кільця. Після відключення напруги зворотна пружина 6 забезпечує зворотний хід. Наявність короткозамкненого кільця дає змогу індукувати додаткові струми та модифікувати розподіл магнітного потоку, тим самим підвищуючи енергію удару без збільшення габаритів котушки.

Ще одна група рішень спрямована на оптимізацію форми та розмірів якоря і стопа статора. У патенті [10] запропоновано електромагнітний прес (рис. 1.3), у якому підвищення зусилля удару досягається завдяки виконанню якоря у вигляді плоского диска 7 та циліндричного осердя 8 довжиною (0,5...0,8) довжини котушки 3, тоді як стоп статора 9 має висоту (0,2...0,5) довжини котушки. Такий прес містить статор 2 з котушкою 3, яркір 1, зворотну пружину 4, станину 5 та корпус 6, який одночасно виконує роль кожуха і направляючої для якоря. Повітряний зазор 10 виконано однаковим як між торцем статора 2 і плоским диском 7, так і між циліндричною частиною 8 і стопом 9. При подачі імпульсу напруги на котушку 3 яркір 1 рухається вниз, а тягове зусилля формується як за рахунок робочих потоків у зазорах 10, так і за рахунок потоків розсіяння. Така геометрія забезпечує сприятливий розподіл магнітного поля та підвищену енергію удару при відносно компактних розмірах.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						13
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

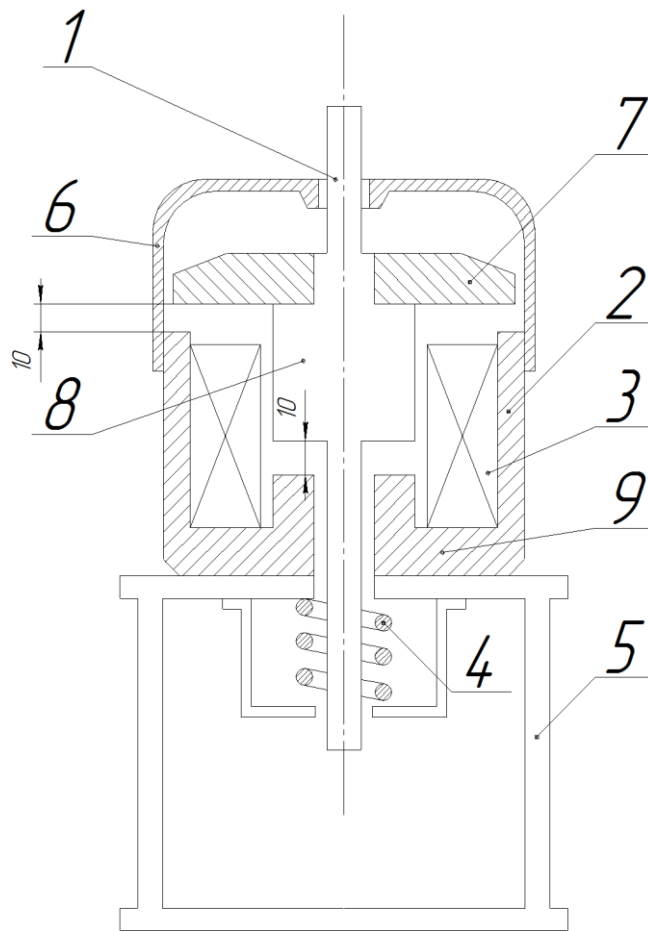


Рисунок 1.3 – Електромагнітний прес із якорем у вигляді циліндричного осердя та плоского диска

Інший спосіб підвищення енергії удару пов'язаний із формуванням індукційних струмів у спеціально профільованих струмопровідних елементах. У конструкції пресу (рис. 1.4) [11] використано короткозамкнене електропровідне кільце 9 трикутного перерізу, зовнішній діаметр якого дорівнює діаметру якоря 1. В торці якоря виконана концентрична канавка з перерізом, що відповідає профілю кільця, у якій воно змонтоване. Конструкція включає якор 1 з плоскою дисковою частиною 2, статор 4 з котушкою 5, направляючий стержень 3, зворотну пружину 6, станину 7 та корпус 8 із направляючою. При подачі імпульсу напруги на котушку 5 якір 1 здійснює робочий хід вниз, а тягове зусилля формується в робочих зазорах 10 та за рахунок взаємодії струму котушки 5 з магнітним потоком  $\Phi$ , що виходить із бокової поверхні якоря. На початку руху зростаючий магнітний потік індукує в кільці 9 струм, протилежний струму котушки.

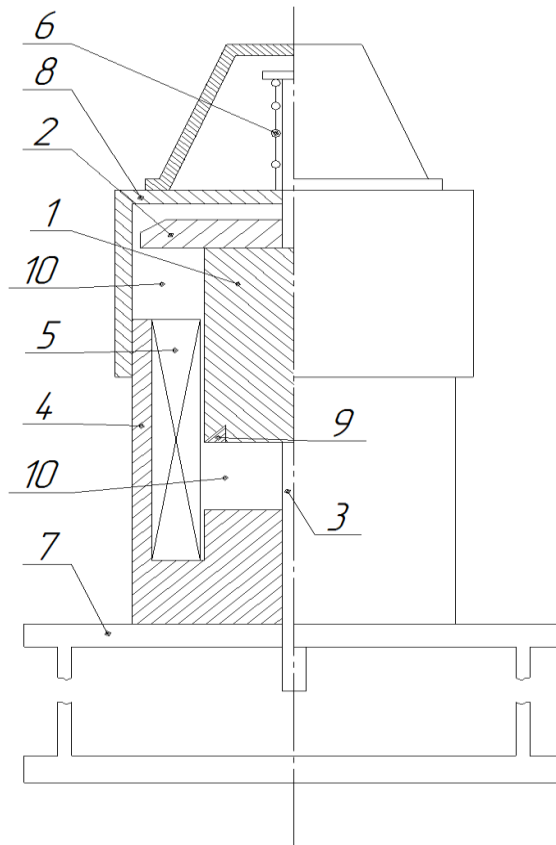


Рисунок 1.4 – Електромагнітний прес з струмопровідним кільцем трикутного перерізу

Це приводить до витіснення магнітного потоку з об'єму кільця і його концентрації вздовж зовнішньої поверхні якоря, причому скошена поверхня кільця «захоплює» більше витків обмотки. У результаті збільшується взаємодія між полем і обмоткою, а отже зростає енергія удару та швидкість руху якоря.

Для розширення діапазону робочих режимів і зміни тягової характеристики електромагніта в іншій конструкції (рис. 1.5) [12] статора застосовано ступінчастий стоп. Електромагнітний прес містить статор 1 з обмоткою 2, верхня частина якого має триступінчастий стоп із ступенями 3, 4 і 5, та комбінований якір. Частина якоря, що притягується, виконана у вигляді роз'ємних дисків 6, 7, 8, внутрішня поверхня яких у місцях спраження зі стягуючою частиною 9 має форму циліндрів та почергово зрізаних конусів. На стягуючій частині якоря виконано упори 10 та 11. Конструкція також містить фланець 12, станину 14 та зворотну

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

пружину 13. При подачі струму на обмотку 2 магнітний потік  $\Phi$  спочатку замикається через диск 6 і ступінь 3 (найменший зазор), створюючи початкове тягове зусилля.

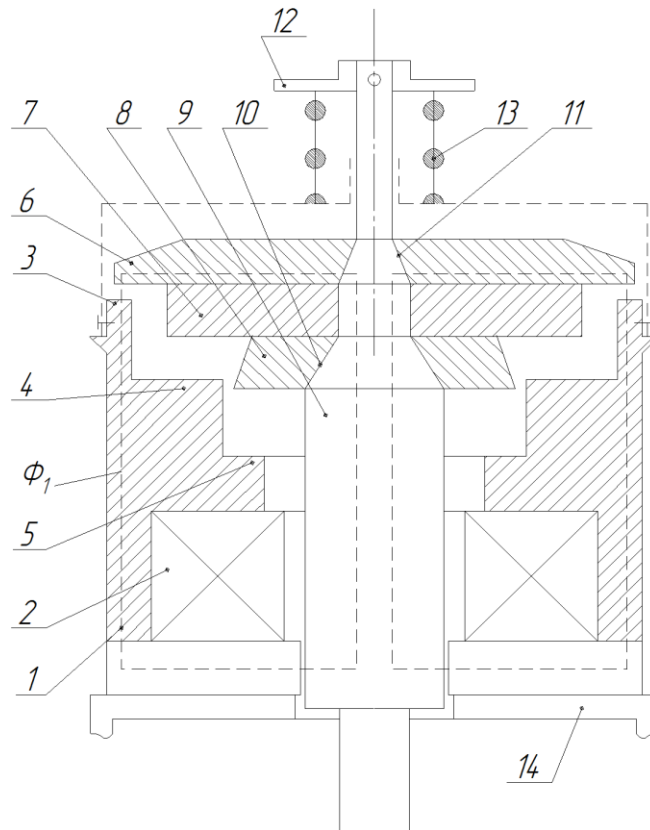


Рисунок 1.5 – Електромагнітний прес з ступінчастим стопом

Після часткового переміщення втяжної частини 9 утворюється нова система зазорів, і магнітний потік послідовно переноситься на диск 7 (ступінь 4), а далі на диск 8 (ступінь 5). Кожен етап супроводжується формуванням додаткового тягового зусилля, що передається на якоря. Таким чином реалізується багатоступеневе нарощування зусилля та можливість формування складної тягової характеристики.

Окремий напрямок підвищення енергетичних можливостей ЛЕМД базується на застосуванні фіксаторів, які забезпечують штучне утримання якоря до досягнення необхідного рівня магнітної енергії. У конструкції пресу з підпружиненими фіксаторами (рис. 1.6) [13] станина 1, статор 2 з котушкою 3, направляючий корпус 5, зворотна пружина 6 та кожух 7 доповнені системою фіксаторів 10 з

пружинами 8 і регулювальними гвинтами 9. На циліндричній частині якоря 4 виконано фігурний виступ 11 (наприклад, у вигляді гайки), що зчіплюється з фіксаторами.

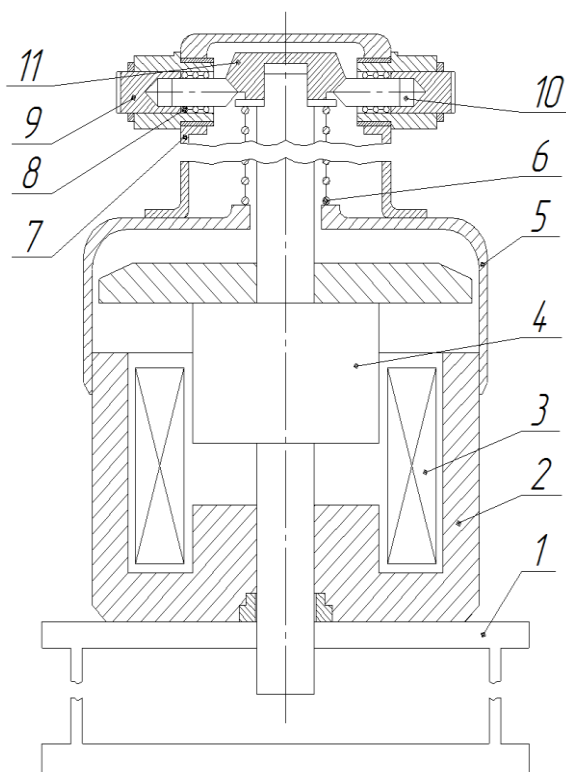


Рисунок 1.6 - Електромагнітний прес із підпружиненими фіксаторами

Перед початком ходу виступ 11 утримується фіксаторами 10, а при подачі імпульсу струму в котушку 3 якір протягом певного часу залишається заблокованим, поки струм не досягне заданого значення. Сила утримування регулюється підтисненням пружин 8 гвинтами 9. Коли електромагнітна сила перевищує силу фіксації, якір різко зривається з місця та здійснює робочий хід із підвищеною енергією удару і швидкістю. Після відключення струму зворотна пружина 6 повертає якір у вихідне положення, де фігурний виступ знову входить у зачеплення з фіксаторами, готуючи систему до наступного циклу.

Узагальнюючи аналіз патентних рішень, можна виділити кілька основних шляхів підвищення ефективності лінійних електромагнітних двигунів та електро-

магнітних пресів ударної дії: використання додаткових гідравлічних камер і рідинного підсилення зусилля; застосування короткозамкнених кілець та спеціального профілю струмопровідних елементів для інтенсифікації взаємодії магнітного поля з обмотками; оптимізацію форми й розмірів якоря та стопа для раціонального розподілу магнітного потоку; реалізацію багатоступінчастих магнітних систем зі змінною тяговою характеристикою; використання механічних або електромагнітних фіксаторів для роботи в режимі статичного індуктивного накопичення енергії. Зазначені підходи створюють науково-технічне підґрунтя для подальшої розробки систем живлення та керування електромагнітними пресами з підвищеними енергетичними характеристиками.

### 1.3 Огляд сенсорів і систем зворотного зв'язку для керування ударним приводом

Функціонування лінійних електромагнітних двигунів ударної дії значною мірою залежить від точності контролю їхнього руху та здатності системи керування своєчасно реагувати на зміну параметрів робочого циклу. Для забезпечення стабільної роботи, підвищення енергоефективності та точності формування імпульсу зусилля необхідно використовувати сучасні сенсорні системи та алгоритми зворотного зв'язку, які дають змогу відстежувати положення якоря, швидкість його переміщення, рівень струму та напруги в обмотках, а також синхронізувати ці параметри з фазою формування удару [14-17].

Однією з ключових груп сенсорів є датчики положення, що забезпечують визначення початкового та кінцевого положення якоря, а також контроль проміжних фаз ходу. До найпоширеніших належать індуктивні датчики, які формують сигнал унаслідок зміни магнітної проникності в зоні датчика, та добре працюють у середовищах із підвищеною вібрацією. Значно вищу точність забезпечують оптичні датчики, що вимірюють переміщення завдяки перериванню світлового по-

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

току, проте вони чутливі до забруднень. Окреме місце займають магнітостри-  
ційні датчики, що дозволяють отримувати безконтактну інформацію про поло-  
ження з високою роздільною здатністю та мінімальною затримкою. Використання  
таких сенсорів є особливо доцільним у пресових системах із високими швидкос-  
тями переміщення якоря.

Для контролю електромагнітного режиму необхідними є датчики струму  
та напруги, що дають можливість оцінювати динаміку наростання струму в кату-  
щі, виявляти аномальні режими та забезпечувати точне відключення утримую-  
чого електромагніта при досягненні струму зрушування. Датчики струму (шун-  
тові, датчики на ефекті Холла та ін.) гарантують стабільність режимів пуску та  
контроль енергії, що накопичується в магнітній системі. Вимірювання напруги  
дозволяє контролювати роботу силових ключів і визначати реальний стан джерела  
живлення.

Для аналізу динамічних характеристик ЛЕМД застосовуються датчики  
швидкості або системи обробки сигналів положення, що дозволяють обчислювати  
миттєву швидкість руху якоря. Ця інформація є критично важливою при форму-  
ванні оптимальної енергетичної характеристики удару, коли швидкість руху має  
відповідати вимогам технологічного процесу.

У системах керування працюють контролери, які виконують функції вимі-  
рювання часу руху якоря, визначення початкового положення, фіксації моментів  
початку та кінця удару, а також регулювання параметрів імпульсу живлення. Мі-  
кроконтролери або спеціалізовані цифрові сигнальні процесори (DSP) аналізують  
дані від сенсорів у реальному часі та коригують форму імпульсу, забезпечуючи  
високу повторюваність технологічного циклу.

Одним із ключових завдань системи керування є синхронізація імпульсу  
живлення з фазою руху якоря. У режимах статичного утримування необхідно за-  
безпечити чітке відключення утримуючого електромагніта та подання імпульсу  
основної обмотки в момент, коли струм досягне потрібної величини. Це дозволяє  
сформуванню оптимальний профіль сили, що забезпечує максимальну енергію

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

удару. Синхронізація може здійснюватися за часом, за струмом або за положенням, а також за комбінованими алгоритмами, що підвищують точність керування.

Таким чином, застосування датчиків положення, швидкості, струму й напруги у поєднанні з цифровими системами керування забезпечує високий рівень адаптивності та точності роботи електромагнітного пресу. Сучасні сенсорні системи дозволяють підвищити стабільність технологічних операцій, енергоефективність та надійність обладнання, що є важливим для створення ефективних виконавчих механізмів ударної дії нового покоління.

#### 1.4 Сучасні системи керування імпульсними електромагнітними приводами

Керування імпульсними електромагнітними приводами, до яких належать лінійні електромагнітні двигуни ударної дії, потребує високої точності формування електромагнітного імпульсу, мінімальних затримок у роботі силових ключів та здатності системи оперативно реагувати на зміну електричних і механічних параметрів [18-20]. Сучасні системи керування покликані забезпечити необхідну динаміку, надійність і стабільність технологічного процесу, оскільки саме від якості керування залежить форма силового імпульсу, енергія удару, повторюваність циклів та енергоефективність роботи приводу.

Однією з ключових складових сучасних систем керування є мікроконтролерні модулі, які виконують функцію високошвидкісної обробки сигналів та координації роботи виконавчих елементів. У практиці керування ЛЕМД найчастіше використовують мікроконтролери сімейств STM32, AVR та ESP.

Мікроконтролери STM32 (ядро ARM Cortex-M) відзначаються високою продуктивністю, великою кількістю апаратних таймерів і АЦП, а також наявністю модулів апаратного ШІМ, що робить їх оптимальними для керування силовими транзисторними ключами та аналізу даних із сенсорів у режимі реального часу. Контролери AVR (наприклад, ATmega) мають простішу архітектуру, але достатні

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк. 20
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ресурси для реалізації базових імпульсних алгоритмів і широко застосовуються у недорогих експериментальних установках. Платформи ESP32/ESP8266 забезпечують додаткові можливості бездротової комунікації, що може бути корисним для віддаленого моніторингу або налаштування параметрів пресового обладнання.

Для реалізації силової частини в системах керування застосовуються потужні драйвери та транзисторні ключі, які забезпечують подачу імпульсу на котушку ЛЕМД із необхідними параметрами струму та напруги. У потужних пресових системах використовують MOSFET- або IGBT-транзистори, що мають високу комутаційну швидкість і здатні витримувати великі імпульсні струми. Драйвери транзисторів забезпечують гальванічну розв'язку, коректний рівень керуючих сигналів і захист ключів від перевантаження. У сучасних системах нерідко застосовуються інтегровані драйвери з вбудованими системами контролю температури, струму та перенапруги, що підвищує надійність роботи пристрою.

Важливою складовою керування є алгоритми ШІМ- та імпульсного регулювання, які визначають форму імпульсу струму в обмотці та дозволяють оптимізувати процес накопичення магнітної енергії. Широтно-імпульсна модуляція широко застосовується для плавного регулювання струму при підготовці системи до удару, підвищення енергоефективності та уникнення надмірних пікових навантажень. Імпульсне керування, яке передбачає подачу коротких високих імпульсів струму на обмотку, використовується для формування максимальної тягової сили на початку руху якоря та оптимального використання можливостей електромагнітного утримувача. Алгоритми часто інтегруються з даними сенсорів положення та струму, що дозволяє створювати адаптивні режими, у яких форма імпульсу змінюється залежно від фактичної поведінки якоря.

Разом із тим сучасні системи керування мають певні обмеження та вимоги до швидкодії. Для ефективної роботи ЛЕМД необхідна мінімальна затримка між зміною стану електромагнітного поля та реакцією якоря; затримка в обробці сигналів більше кількох мікросекунд може призвести до зниження енергії удару або

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

нестабільності циклу. Також критичними є вимоги до електромагнітної сумісності, оскільки імпульсні навантаження створюють високі перешкоди, які можуть ускладнювати роботу контролера та датчиків. Силкові ключі мають витримувати короточасні пікові струми, що часто перевищують номінальні значення в 3–5 разів. Термін служби елементів залежить від якості охолодження та режиму використання.

Таким чином, сучасні системи керування імпульсними електромагнітними приводами поєднують високопродуктивні мікроконтролери, швидкодійні силкові транзисторні модулі та адаптивні алгоритми формування імпульсу, що дозволяє забезпечити високу енергоефективність, точність і стабільність роботи ударних виконавчих механізмів. Використання таких систем є необхідною умовою створення пресового обладнання нового покоління з підвищеними енергетичними та динамічними характеристиками.

#### 1.5 Огляд блоків керування лінійним електромагнітним двигуном з електромагнітним утримуванням якоря

Підвищення динамічної ефективності лінійних електромагнітних двигунів за рахунок використання пристроїв утримування можливе лише за умови виконання низки вимог до таких пристроїв. Зокрема, вони мають забезпечувати:

- регулювання сили опору руху якоря на початку ходу в досить широких межах;
- створення значного гальмівного зусилля на етапі зрушування при мінімальному опорі подальшому руху якоря в робочій зоні ходу.

Роботу подібної системи розглянемо на прикладі ЛЕМД з автономним електромагнітним утримувачем якоря, виконаним у вигляді окремого утримуючого електромагніта [21]. Найпростішим способом реалізації такого рішення є використання функціональної схеми, поданої на рис. 1.7. Пристрій включає такі основні вузли: блок формування керуючих імпульсів БУ, джерело живлення постійного

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		



Робота двигуна в режимі накопичення магнітної енергії в межах повного робочого циклу відбувається у два основні етапи. На першому етапі, після замикання ключа пульта керування КН, з блока БУ одночасно надходять сигнали на тиристорний перетворювач VT обмотки збудження ЛЕМД та на блок ПЖУ, що керує утримуючим електромагнітом. У цей період якір залишається в статичному рівноважному положенні за рахунок протидіючого зусилля утримуючого електромагніта, тоді як струм в обмотці збудження поступово наростає. Споживана від джерела живлення електрична енергія перетворюється переважно в магнітну й частково в теплову енергію.

Коли струм в обмотці досягає рівня, що відповідає заданому початковому запасу магнітної енергії, з блока БУ формується сигнал на ПЖУ для відключення утримуючого електромагніта. Після зняття утримуючого зусилля якір відривається від опорної поверхні та починає прискорено рухатися під дією магнітного поля в робочому проміжку ходу. Цей момент визначає перехід до другого етапу енергетичного перетворення, коли відбувається власне рух якоря, більш інтенсивне споживання електроенергії та перетворення накопиченої магнітної енергії в кінетичну.

Після завершення робочого ходу обмотка збудження вимикається, а якір під дією сили зворотної пружини 4 повертається у вихідне положення. Шляхом керування моментом відключення утримуючого електромагніта і, відповідно, рівнем початкового запасу магнітної енергії можна цілеспрямовано змінювати динамічні й енергетичні характеристики імпульсних ЛЕМД.

Інший підхід до побудови систем керування полягає у використанні інтегрованих схем, де утримуючий пристрій і двигун конструктивно об'єднані. Така схема ЛЕМД з інтегрованим електромагнітним утримувачем наведена на рис. 1.8. У цьому варіанті двигун має спільний із пристроєм навантаження магнітопровід 1 з обмоткою збудження 2, комбінований якір 3 зі зворотною пружиною 4 та утримуючий електромагніт 5, розміщений з боку дискової частини 6 якоря. Жорстке

						MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
							24
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата			

зв'язування магнітопроводу ЛЕМД та утримуючого електромагніта забезпечує замикання магнітного потоку при будь-якому положенні якоря, що підвищує стабільність роботи системи.

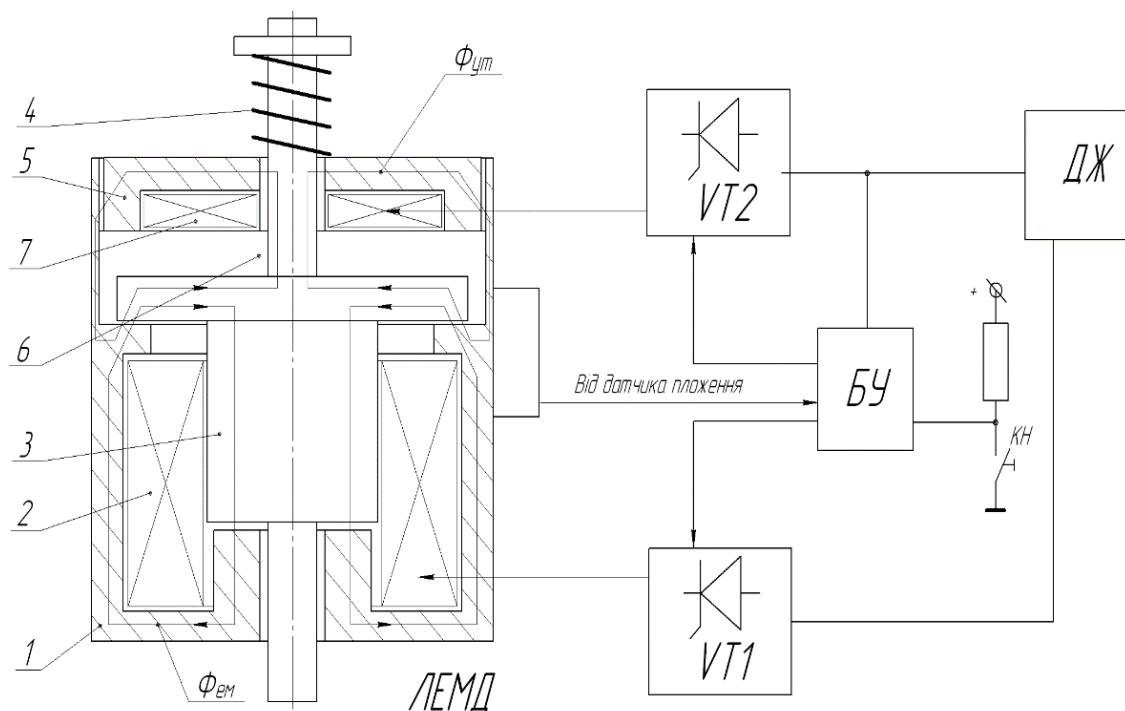


Рисунок 1.8 – Функціональна схема керування інтегрованим лінійним електромагнітним двигуном з пристроєм електромагнітного утримування якоря

З точки зору керування, робота такого двигуна у режимі статичного накопичення магнітної енергії є аналогічною до схеми, наведеної на рис.1.7. При замиканні ключа КН блок БУ формує імпульси керування для двох тиристорних перетворювачів: VT1, що живить обмотку збудження ЛЕМД, та VT2, що живить обмотку утримуючого електромагніта. У початковій фазі обидві обмотки знаходяться під напругою, якір утримується від руху, а в індуктивностях системи накопичується магнітна енергія. Коли в системі досягається заданий рівень енергії, утримуючий електромагніт знеструмлюється, і якір починає прискорений рух, додаючи лише зусилля зворотної пружини.

На завершальній ділянці ходу, за сигналом датчика положення, утримуючий електромагніт знову вмикається. Це призводить до додавання до основного

магнітного потоку, створеного обмоткою збудження, додаткового потоку утримуючого електромагніта. Завдяки спеціальній конфігурації магнітного кола це підвищує електромагнітне зусилля в робочих зазорах, а отже, збільшує кінетичну енергію якоря перед ударом. Після завершення робочого ходу обмотки збудження і утримування вимикаються, а якор повертається у вихідне положення під дією пружини.

Подальший розвиток інтегрованих рішень пов'язаний із застосуванням загального джерела магніторушійної сили для двигуна і функції утримання. У цьому випадку в конструкції відсутні додаткові обмотки або магніти утримувача, а накопичення магнітної енергії при нерухомому якорі здійснюється лише за рахунок основної обмотки збудження. Приклад такої інтегрованої конструкції ЛЕМД [21] наведений на рис.1.9.

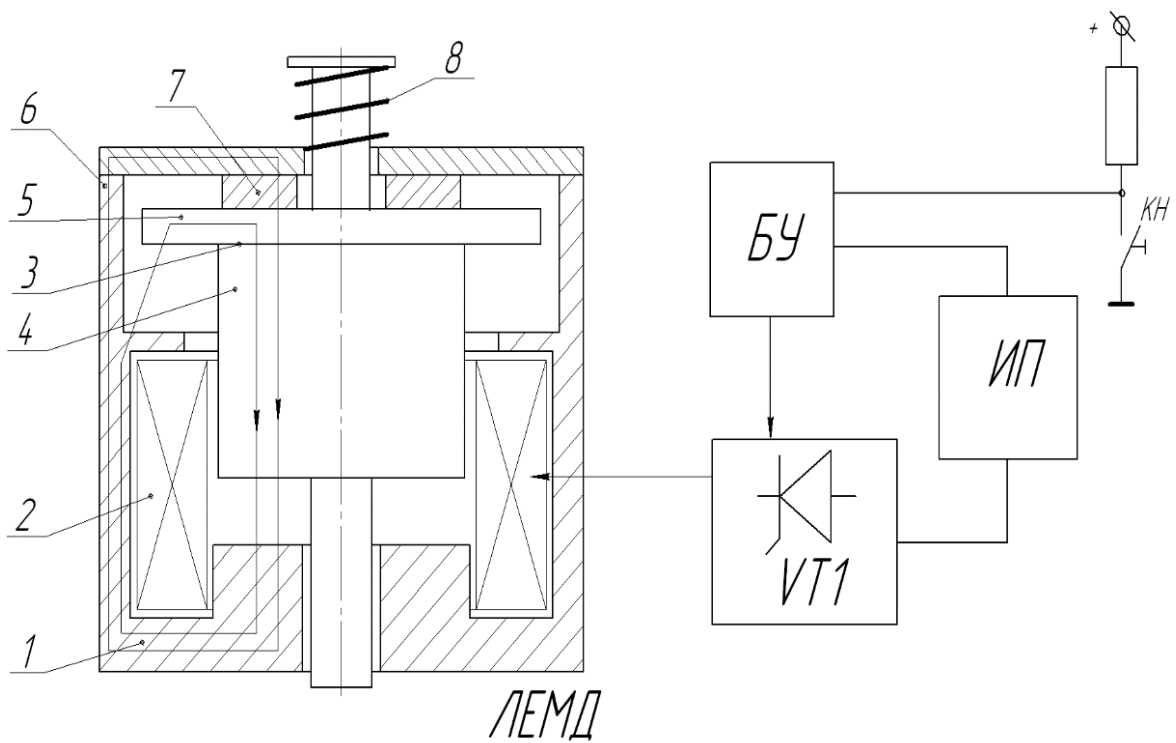


Рисунок 1.9 – Функціональна схема керування лінійним електромагнітним двигуном за принципом із спільним джерелом магніторушійної сили

Двигун містить магнітопровід 1 з обмоткою збудження 2 та якір 3, який має циліндричну 4 і дискову 5 частини. Феромагнітний корпус 6 одночасно виконує роль направляючої. Якір підтискається зворотною пружиною 8 до регульованої шайби 7. Робочі повітряні зазори утворюються між циліндричною і дисковою частинами якоря та магнітопроводом. У режимі статичного накопичувача за рахунок часткового перерозподілу магнітного потоку частина його замикається через феромагнітний корпус і регулюючу шайбу, формуючи утримуюче зусилля. У початковий момент часу це утримуюче зусилля перевищує зусилля в робочих зазорах, що не дає якорю зрушити з місця. У міру зростання струму та магнітного потоку ділянки магнітного ланцюга корпусу входять у насичення, їх магнітний опір зростає, потік перерозподіляється, і зусилля в робочому зазорі стає більшим за силу утримування. У цей момент якір відривається і починає прискорений рух. Повернення у вихідне положення після відключення напруги здійснюється пружиною.

Аналогічний принцип покладений в основу конструкції імпульсного ЛЕМД циліндричної броньової структури з одним робочим зазором, функціональна схема якого наведена на рис.1.10 [21].

Двигун містить магнітопровід 1, обмотку збудження 2 та якір 3. У вихідному стані якір підтиснутий зворотною пружиною 4 до феромагнітного буфера 5, який взаємодіє з кільцевим полюсом 6. Частина магнітного потоку замикається через буфер, створюючи утримуюче зусилля. Зі зростанням струму кільцевий полюс входить у насичення, утримуюче зусилля в неробочому зазорі перестає зростати, а зусилля в робочому зазорі збільшується до моменту відриву якоря.

Після завершення робочого ходу якоря його повернення у вихідне положення знову відбувається під дією зворотної пружини. Живлення обмотки збудження у таких схемах, як правило, реалізується імпульсами напруги, синхронізованими з періодом мережі або з частотою ударних циклів.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						27
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		



енергії в кінетичну енергію поступального руху якоря, дають можливість реалізувати режим статичного індуктивного накопичення енергії та забезпечують високий ступінь керованості силовими параметрами удару. На відміну від традиційних механічних, гідравлічних та пневматичних систем, такі приводи потенційно мають вищу швидкодію, точність і енергоефективність, що робить їх доцільною основою для створення пресового обладнання нового покоління.

Аналіз патентних рішень показав, що підвищення енергетичних і динамічних характеристик лінійних електромагнітних двигунів досягається за рахунок комплексу конструктивних і схемотехнічних заходів: застосування додаткових гідравлічних камер та рідинного підсилення зусилля, використання короткозамкнених кілець і спеціально профільованих струмопровідних елементів, оптимізації форми й розмірів якоря та стопа статора, реалізації ступінчастих магнітних систем зі змінною тяговою характеристикою, а також використання механічних й електромагнітних фіксаторів для режиму статичного накопичення магнітної енергії. Окремо відзначено, що інтегровані схеми з електромагнітним утримуванням якоря дозволяють суттєво підвищити початковий запас магнітної енергії без значного ускладнення габаритів приводу, що є принципово важливим для пресів ударної дії.

Узагальнення отриманих результатів дозволяє сформулювати вимоги до структури, функцій та параметрів розроблюваного пристрою живлення та керування електромагнітним пресом з підвищеними енергетичними характеристиками й обґрунтовує вибір напрямів подальших теоретичних та конструктивних рішень у наступних розділах магістерської роботи.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## 2 РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ ЖИВЛЕННЯ ТА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПРЕСОМ З ПІДВИЩЕНИМИ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

### 2.1 Обґрунтування вибору конструктивної схеми пристрою живлення та керування електромагнітним пресом з електромагнітним утримувачем

Вибір конструктивної схеми пристрою живлення та керування електромагнітним пресом з електромагнітним утримувачем ґрунтується на вимогах до формування високошвидкісного ударного імпульсу, забезпечення повторюваності робочих циклів, енергоефективності та безпечності роботи обладнання. Оскільки ефективність лінійного електромагнітного двигуна у режимі ударної дії безпосередньо залежить від точності керування магнітними процесами, конструктивна схема системи живлення повинна забезпечувати подачу імпульсу електричної енергії з керованими параметрами, а також реалізовувати режим статичного індуктивного накопичення енергії.

У конструкції пресового обладнання буде застосовано автономний електромагнітний утримувач, який забезпечить фіксацію якоря у вихідному положенні до моменту накопичення необхідного рівня магнітної енергії в обмотці ЛЕМД. Це вимагає наявності окремої системи живлення для утримуючого електромагніта та синхронізації її роботи із живленням основного електромагніта. Тому конструктивна схема має бути побудована з виділенням двох незалежних силових трактів - для ЛЕМД і для утримувача - та централізованого керуючого блоку, який координує їхню роботу.

Застосування трансформатора зі спеціалізованими вторинними обмотками дасть змогу формувати два стабільних канали живлення постійного струму, ізольованих один від одного, що підвищить електробезпеку та мінімізує взаємні перешкоди між колами. Використання діодних мостів у кожному силовому колі забезпечить перетворення змінної напруги в постійну, що є обов'язковою умовою

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

для ефективної роботи електромагнітів. Крім того, окрему низьковольтну секцію трансформатора слід використати для живлення кола керування, що дозволить застосовувати малогабаритні реле, датчики та реле часу.

Наявність у схемі реле часу з контрольованою витримкою є критично важливою для забезпечення необхідної затримки між вмиканням утримуючого електромагніта й подачею живлення на основний ЛЕМД. Така організація дозволить спочатку створити гарантоване утримувальне зусилля, а вже після цього - розпочати процес накопичення енергії в обмотці ЛЕМД. Це забезпечить стабільність режиму та повторюваність ударних імпульсів.

Додатковим елементом, що визначає вибір схеми, є необхідність контролю величини струму у колі головного електромагніта. Використання реле струму дозволяє забезпечити точне визначення моменту, коли накопичена магнітна енергія досягає необхідного рівня, після чого відбувається відключення утримуючого електромагніта і початок руху якоря. Таким чином формується оптимальний режим роботи ЛЕМД, який забезпечить максимальну енергію удару.

Конструктивно схема повинна бути доповнена елементами захисту - запобіжником, датчиком положення для відсікання струму після завершення ходу та датчиком безпеки, який забезпечить аварійне вимикання у разі наявності сторонніх предметів у зоні виконання технологічної операції. Усе це зробить систему безпечною для використання на експериментальному стенді та у виробничих умовах.

Таким чином, вибір конструктивної схеми пристрою живлення та керування зумовлений комплексними технічними вимогами: необхідністю реалізації режиму статичного індуктивного накопичення енергії, забезпеченням синхронної роботи двох електромагнітів, контролем струму в обмотці ЛЕМД, високою повторюваністю ударів та гарантованим виконанням функцій захисту й блокування. Обрана структура дозволить досягти оптимальної взаємодії між силовою та керуючою частинами системи, що є ключовою умовою отримання високих енергетичних характеристик пресового обладнання.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## 2.2 Розробка структурної схеми пристрою живлення та керування електромагнітним пресом з електромагнітним утримувачем

Структурна схема (рис. 2.2) є базовою концепцією, що визначає загальну архітектуру пристрою живлення та керування електромагнітним пресом, оснащеним лінійним електромагнітним двигуном (ЛЕМД) та електромагнітним утримувачем. Вона встановлює перелік основних функціональних блоків, їхні зв'язки та призначення, що надалі слугуватиме основою для розробки детальної електричної принципової схеми [22].

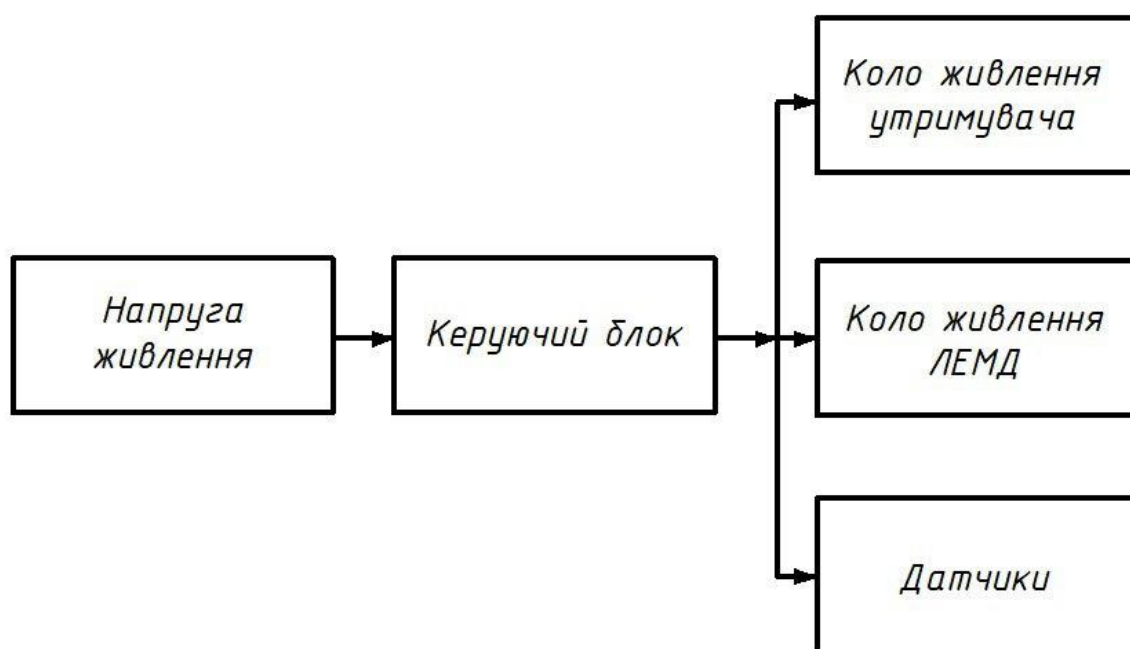


Рисунок 2.1 - Структурна схема пристрою живлення та керування електромагнітним пресом з електромагнітним утримувачем

Першим елементом структурної схеми є джерело напруги живлення, яке забезпечує подачу електричної енергії на всі вузли пристрою. На цьому рівні схема відображає лише факт наявності зовнішнього живлення, без уточнення типу трансформатора, способу випрямлення чи параметрів стабілізації, які будуть визначені під час розробки остаточної електричної схеми.

Центральною частиною є керуючий блок, який отримує живлення від вхідного джерела та забезпечує логічне керування робочими циклами преса. На етапі структурної схеми цей блок позначає комплекс функцій, пов'язаних із запуском пристрою, формуванням керуючих сигналів для силових кіл, реалізацією часових затримок, контролем режимів роботи та забезпеченням безпеки. Структурно він є вузлом, що опрацьовує сигнали від датчиків і формує команди для силових елементів, однак конкретна апаратна реалізація (реле, мікроконтролер, силові ключі тощо) буде деталізована на наступному етапі.

Від керуючого блока відходять три основні функціональні гілки.

Перша – коло живлення утримувача, яке призначене для керування електромагнітним утримувачем, що фіксуватиме якір ЛЕМД у початковому положенні під час накопичення магнітної енергії. На рівні структурної схеми це коло визначає лише логічну функцію – створення і відключення утримувального зусилля, без вказання конкретних електротехнічних компонентів.

Друга гілка – коло живлення ЛЕМД, яке забезпечуватиме живлення основної силової обмотки лінійного електромагнітного двигуна. Саме через цю гілку буде реалізовано імпульсне живлення, необхідне для формування ударного імпульсу преса. На структурному рівні окреслюється лише взаємозв'язок між керуючим блоком і силовим елементом, а параметри струмів, напруг, випрямлячів та захистів будуть розраховані після завершення формування технічних вимог.

Третя гілка – підсистема датчиків, що включатиме датчик крайнього положення якоря та датчик безпеки. На цьому рівні структурної схеми датчики представлені як джерела інформаційних сигналів, що забезпечують зворотний зв'язок для керуючої системи. Сам принцип роботи датчиків, типи сигналів та електричні параметри визначатимуться під час деталізації принципової електричної схеми.

Узагальнюючи, структурна схема встановлює основну логіку роботи пристрою: зовнішнє живлення подається на керуючий блок, який виконує функцію централізованого управління. Далі керуючий блок розподіляє сигнали на силові кола утримувача, лінійного електромагнітного двигуна та приймає інформацію

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

від датчиків. Такий підхід забезпечує чіткий функціональний поділ системи на енергетичну, керуючу та сенсорну частини, що є необхідною умовою для подальшої розробки повної електричної схеми пресового обладнання та оптимізації його роботи в режимі статичного індуктивного накопичення енергії.

### 2.3 Опис конструкції електромагнітного пресу з підвищеними енергетичними характеристиками

Пресове обладнання з лінійним електромагнітним двигуном та електромагнітним утримувачем для якого розробляється блок живлення призначене для виконання технологічних операцій імпульсного вирубування деталей у взуттєвому та інших галузях легкої промисловості. Його компоновка забезпечує формування високошвидкісного ударного імпульсу з точним керуванням моментом його прикладання. Загальний вигляд експериментального зразка пресу наведено на рис. 2.2.

Лінійний електромагнітний двигун (позиція 1).

Основним силовим елементом установки є лінійний електромагнітний двигун, який забезпечує формування ударного імпульсу шляхом перетворення енергії електромагнітного поля в кінетичну енергію поступального руху якоря. Конструкція ЛЕМД включає магнітопровід, котушку збудження та рухомий якор, встановлений у напрямних та здатний розвивати значні прискорення у момент подачі імпульсу струму.

Особливістю цієї конструкції є можливість роботи в режимі статичного індуктивного накопичення енергії, коли якор утримується у фіксованому положенні до досягнення необхідного струму зрушування. Це дозволяє різко збільшити початкову силу тяги та забезпечити високу енергію удару при порівняно невеликій потужності джерела живлення.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		



1 – лінійний двигун; 2 – пристрій для утримування якоря;  
 3 – консоль; 4 – ударник; 5 – робочий інструмент; 6 – опорна плита.

Рисунок 2.2 – Пресове обладнання з ЛЕМД:

Електромагнітний утримувач якоря (позиція 2).

У верхній частині ЛЕМД розміщено електромагнітний утримувач, який забезпечує тимчасову фіксацію якоря у вихідному положенні. Утримувач створює протидію руху до моменту накопичення необхідного рівня магнітної енергії в основній обмотці двигуна. Після досягнення заданого струму утримуючий електромагніт вимикається, і якор здійснює різкий прискорений рух.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА25.00.00.000 ПЗ

Арк.

35

Застосування утримувача дозволяє:

- збільшити швидкість якоря на початку руху;
- підвищити кінетичну енергію удару;
- забезпечити стабільність технологічного циклу;
- зменшити енергетичні втрати.

Консоль (позиція 3).

Консоль виконує функцію несучої конструкції, на якій фіксується ЛЕМД разом з утримувачем. Вона забезпечує необхідну жорсткість та точне розташування рухомих елементів відносно робочої зони. Консоль виготовлена зі сталевого профілю та закріплена таким чином, щоб сприймати ударні навантаження, передані від рухомої частини двигуна до робочого інструмента.

Ударник (позиція 4)

Ударник є проміжною ланкою між якорем ЛЕМД та вирубним інструментом. Він передає імпульс сили, рівномірно розподіляючи навантаження по площі різака. Конструкція ударника передбачає достатню масу та міцність, що забезпечує його стійкість до багаторазових циклів роботи та запобігає небажаним деформаціям, які можуть вплинути на точність вирубування.

Опорна плита (позиція 5).

Опорна плита слугує жорсткою основою для розміщення матеріалу та вирубної плити. Вона сприймає реактивне зусилля від удару та забезпечує стабільність пресового обладнання. Плита виготовлена зі сталі підвищеної твердості, що дозволяє мінімізувати її зношування під час експлуатації.

Робочий інструмент.

Робочим інструментом є вирубний різак, геометрія якого відповідає контуру виготовлюваної деталі. Різак встановлюється вручну оператором та фіксується на вирубній плиті. Якість виконання технологічної операції значною мірою залежить від конструкції різака, гостроти ріжучої кромки та типу матеріалу, що підлягає вирубуванню.

Загальна характеристика конструкції.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Компоновка пресового обладнання з ЛЕМД характеризується компактністю, високою жорсткістю та можливістю легкої технічної адаптації під різні типи технологічних операцій. Інтеграція електромагнітного утримувача з лінійним двигуном дозволяє реалізувати режим імпульсного навантаження з максимальною ефективністю, зберігаючи при цьому стабільність та повторюваність ударних циклів.

Конструкція забезпечує:

- підвищену енергію удару;
- можливість роботи з різними матеріалами;
- мінімальні втрати енергії в механічних ланках;
- високий рівень керованості процесом;
- ергономічне розташування вузлів для регулювання та обслуговування.

Таким чином, конструкція пресу з ЛЕМД та електромагнітним утримувачем для якої розробляється блок живлення, відповідає вимогам сучасних технологічних процесів вирубування в легкій промисловості й забезпечує високу продуктивність, енергоефективність та точність роботи.

#### 2.4 Принцип роботи пресового обладнання з підвищеними енергетичними характеристиками

Електромагнітний прес з підвищеними енергетичними характеристиками працює за принципом перетворення енергії магнітного поля обмотки лінійного електромагнітного двигуна у кінетичну енергію рухомих елементів, яка передається різальному інструменту у вигляді удару. Робочий цикл складається з послідовних етапів підготовки, накопичення енергії, формування удару, вирубування та зворотного ходу.

Перед початком роботи матеріал укладають на вирубну плиту, на яку встановлюють вирубний різак з контуром деталі. Для забезпечення чистого різку застосовують переважно полімерні плити, в які різак може занурюватися на невелику

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						37
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

глибину; використання металевої плити обмежене через інтенсивне затуплення ріжучої кромки.

Після подачі напруги на робочу обмотку ЛЕМД у магнітопроводі формується магнітне поле, що створює тягове зусилля на якорі. Одночасно вмикається утримуючий електромагніт, який через дисковий якір фіксує рухому систему у верхньому положенні, а зворотна пружина додатково протидіє переміщенню. У цей проміжок відбувається накопичення магнітної енергії до заданого рівня.

Коли струм у котушці досягає порогового значення, система керування відключає утримуючий електромагніт. Утримувальне зусилля зникає, і якір під дією електромагнітних сил розпочинає прискорений рух вниз, стискаючи зворотну пружину. Через шток рух передається на ударник, який завдає удару по різачу та забезпечує прорізання матеріалу до контакту з вирубною плитою.

У кінці ходу частина кінетичної енергії гаситься пружинними елементами, що зменшує ударні навантаження та вібрації конструкції. Після завершення вирубання стиснута пружина розтискається і повертає якір, шток та ударник у вихідне положення; гальмівна дія пружин запобігає вторинним ударам і резонансним коливанням. Після відновлення початкового положення прес готовий до повторного циклу, який може запускатися вручну або автоматизовано.

Таким чином, узгоджена робота обмотки ЛЕМД, утримуючого електромагніта, пружинного вузла та механізму передавання руху забезпечує перетворення накопиченої магнітної енергії в потужний, керований ударний імпульс, достатній для якісного та стабільного вирубання деталей з різних матеріалів.

## 2.5 Розробка пристрою живлення та керування пресового обладнання з ЛЕМД із електромагнітним утримувачем

Принцип роботи лінійного електромагнітного двигуна в режимі статичного індуктивного накопичувача ґрунтується на штучному підвищенні початкового струму зрушування якоря до значення, близького до усталеного робочого струму.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Для реалізації такого режиму якір на початку циклу примусово утримується у нерухомому зрівноваженому положенні автономним електромагнітним утримувачем, тоді як в обмотці збудження ЛЕМД наростає струм. За цей час електрична енергія, що надходить від джерела живлення, перетворюється переважно в магнітну енергію поля і частково в теплові втрати в обмотці. Після відключення утримуючого електромагніта створений запас магнітної енергії швидко переходить у кінетичну енергію руху якоря, що забезпечує збільшення швидкості та енергії удару пресового обладнання порівняно з роботою без попереднього накопичення.

Розроблений пристрій живлення та керування призначений для роботи від однофазної мережі змінного струму напругою 220 В і структурно складається з трьох основних частин: кола живлення лінійного електродвигуна, кола живлення утримувача та керуючого блоку.

Електрична принципова схема подана на кресленні [МРМА25.00.00.000С2] і на рис.2.3.

Живлення на схему подається через мережевий вимикач SA1 і запобіжник FU1, після чого напруга надходить на первинну обмотку трансформатора Т1. Вторинні обмотки трансформатора формують роздільні кола постійного струму для живлення головного електромагніта L1, утримуючого електромагніта L2 та низьковольтного кола автоматики керування. У колах силових обмоток L1 і L2 передбачені випрямлячі на діодних мостах (VD1–VD4, VD5–VD8), що забезпечують перетворення змінної напруги трансформатора в постійну напругу живлення катушок.

Керуючий блок, утворений кнопкою SB1, проміжними реле KM1, KM2, реле часу КЧ1, реле KM3, а також датчиками положення Д1 та ДП, організує послідовність етапів робочого циклу. Після включення SA1 і подачі напруги на Т1 запуск робочого циклу здійснюється натисканням кнопки SB1. При цьому спрацьовує реле KM1, яке замикає свій самопідхоплюючий контакт KM1.1 і забезпечує живлення схеми після відпускання кнопки.

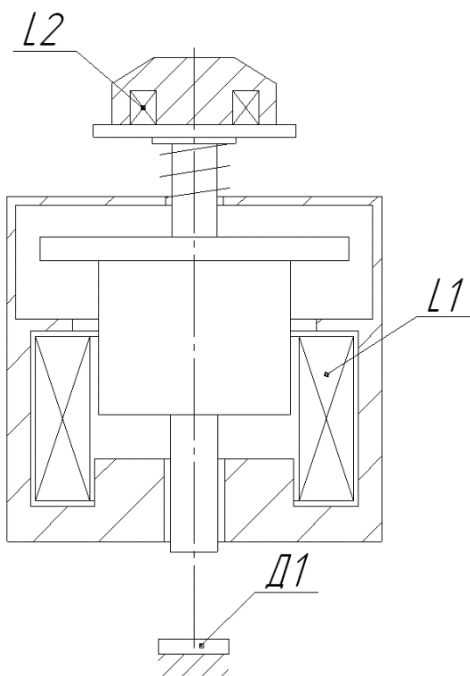
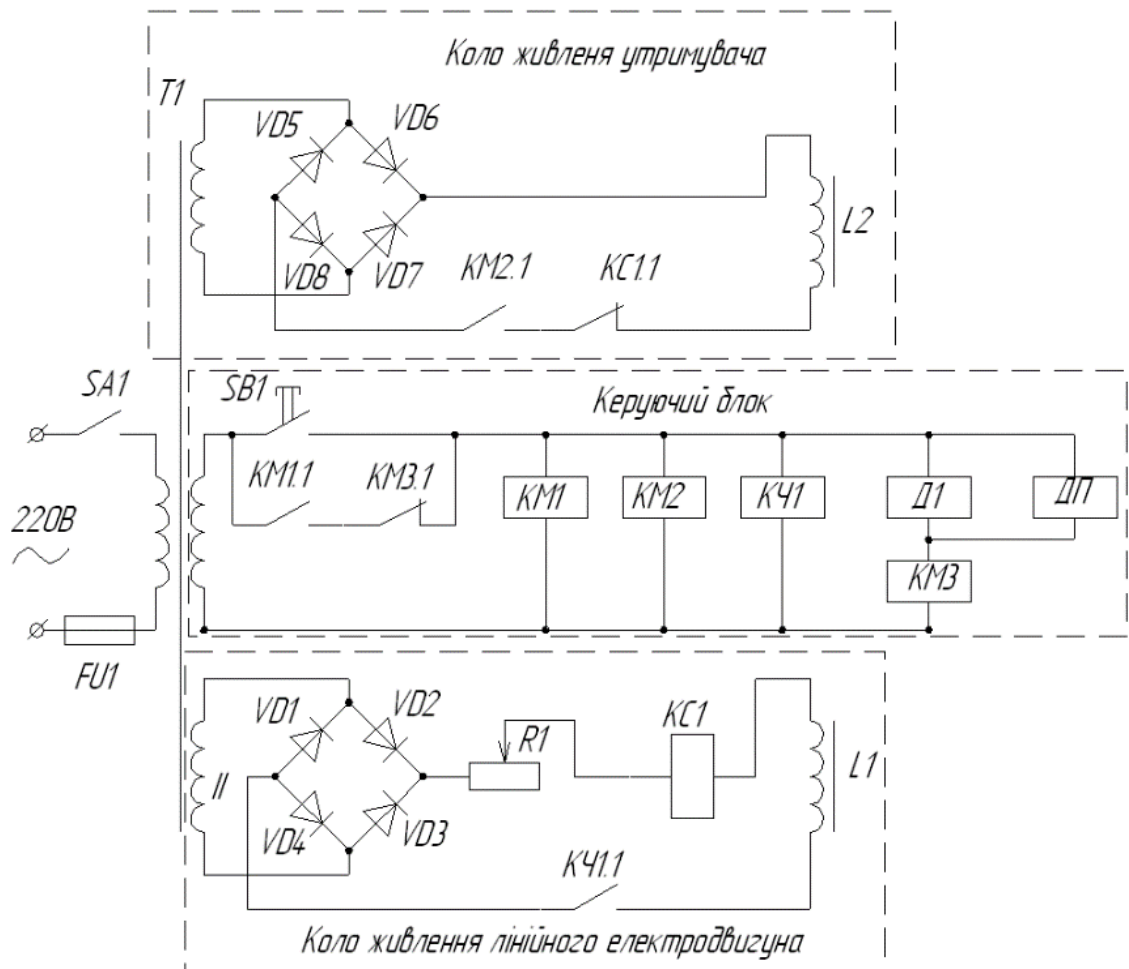


Рисунок 2.3 – Пристрій живлення та управління установки з ЛЕМД із електромагнітним утримувачем

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА25.00.00.000 ПЗ

Арк.  
40

Одночасно спрацьовує реле КМ2, що своїм контактом КМ2.1 вмикає коло живлення утримуючого електромагніта L2 і подає напругу на реле часу КЧ1. У результаті L2 створює необхідне утримувальне зусилля, яке фіксує якір у верхньому положенні, а реле часу розпочинає відлік інтервалу, за який гарантовано повинно встановитися сталє магнітне поле в колі утримувача.

Після відліку заданої витримки реле часу КЧ1 замикає контакт КЧ1.1, через який живлення подається на силовий випрямляч кола ЛЕМД і обмотку головного електромагніта L1. Струм у колі L1 зростає по індуктивному закону, проходячи через вимірювальний резистор R1, на якому формується сигнал для реле струму КС1.

Параметри R1 задають порогове значення струму зрушування, що відповідає необхідному початковому запасу магнітної енергії в системі. У момент, коли струм у котушці L1 досягає встановленої уставки, реле КС1 спрацьовує і розмикає свій контакт КС1.1 у колі живлення утримуючого електромагніта L2.

Після знеструмлення L2 утримувальне зусилля зникає, якір головного електромагніта втрачає опору і починає прискорений робочий рух під дією магнітного поля в робочому зазорі, перетворюючи накопичену магнітну енергію в енергію удару.

Наприкінці робочого ходу якір спрацьовує датчик крайнього положення Д1, встановлений у зоні нижньої точки траєкторії. Сигнал від Д1 подається на котушку реле КМ3, яке розмикає свій контакт КМ3.1 в колі живлення L1 і відключає головний електромагніт від джерела живлення. Після зняття струму в обмотці магнітне поле зменшується, і якір повертається у вихідне верхнє положення під дією зусилля зворотної пружини, здійснюючи холостий хід. При необхідності повторення циклу оператор знову натискає кнопку SB1, і описана послідовність дій повторюється.

Для забезпечення безпечної експлуатації в схемі передбачено додатковий датчик положення ДП, розташований у зоні робочої плити преса. При потраплянні стороннього предмета або руки оператора в небезпечну зону під час циклу ДП

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

розмикає своє коло керування, що також призводить до знеструмлення котушки КМЗ і, як наслідок, до негайного відключення обмотки L1. Таким чином, ударний імпульс не формується, а прес переходить у безпечний стан. Захист від коротких замикань і перевантажень силової частини забезпечується встановленням запобіжника FU1 у мережевому колі та правильним вибором номіналів силових елементів.

Запропонована система живлення та керування дозволяє реалізувати режим статичного індуктивного накопичення магнітної енергії, забезпечити узгоджену у часі роботу обмоток ЛЕМД L1 і утримуючого електромагніта L2, а також реалізувати гнучке регулювання енергетичних параметрів удару через зміну уставки струмового реле КС1 і витримки часу реле КЧ1. Наявність датчиків положення та елементів захисту підвищує надійність і безпечність роботи пресового обладнання, що є принципово важливим для експериментальної установки з підвищеними енергетичними характеристиками.

## 2.6 Загальний вигляд пристрою живлення та керування електромагнітним пресом з електромагнітним утримувачем

На основі електричної схеми пристрою живлення та керування електромагнітним пресом з електромагнітним утримувачем (рис.2.3) було виготовлено корпус та вмонтовано в нього розраховані радіоелементи. Даний прилад наведено на рис.2.4 та 2.5.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 2.4 – Загальний вигляд блоку живлення та керування



Рисунок 2.5 – Загальний вигляд блоку живлення та керування з вмонтованими радіoeлементами

## 2.7 Висновки до другого розділу

У другому розділі обґрунтовано вибір конструктивної та структурної схем пристрою живлення і керування електромагнітним пресом з електромагнітним утримувачем, виходячи з вимог до реалізації режиму статичного індуктивного на-

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА25.00.00.000 ПЗ

Арк.  
43

копичення енергії, підвищення енергоефективності та забезпечення безпечної роботи обладнання. Показано доцільність розділення системи на три функціонально пов'язані підсистеми: коло живлення лінійного електромагнітного двигуна, коло живлення утримувача якоря та керуючий блок, що координує їхню взаємодію й опрацьовує сигнали від датчиків положення та безпеки. Обґрунтовано використання окремих вторинних обмоток трансформатора, діодних випрямлячів, реле часу та реле струму як базових елементів, які забезпечують формування керованого ударного імпульсу з потрібними енергетичними параметрами.

На основі аналізу конструкції електромагнітного пресу з ЛЕМД та електромагнітним утримувачем описано компоновку основних механічних вузлів: лінійного двигуна, утримувача, консолі, ударника, робочого інструмента й опорної плити. Показано, що така конструкція дає змогу реалізувати високошвидкісний ударний режим з мінімальними втратами в механічних ланках, забезпечити точне позиціонування ударних органів та стабільну якість операції вирубування деталей. Розроблена електрична схема живлення і керування деталізує послідовність роботи пресу: початкове вмикання, формування утримувального зусилля, накопичення магнітної енергії в обмотці ЛЕМД, момент відключення утримувача за сигналом реле струму, формування удару та його завершення за сигналом датчика крайнього положення, а також аварійне вимикання за сигналом датчика безпеки.

У межах розділу здійснено практичну реалізацію блоку живлення та керування у вигляді компактного пристрою в дерев'яному корпусі, у якому розміщено всі розраховані радіоелементи силової та керуючої частин. Така конструкція забезпечує необхідну електробезпеку, зручність монтажу й обслуговування, а також дозволяє оперативно змінювати уставки реле струму та витримку часу для налаштування енергетичних характеристик удару. Отже, результати другого розділу створюють завершену технічну основу для подальших експериментальних досліджень роботи електромагнітного пресу в імпульсному режимі та оптимізації його параметрів.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						44
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## 3 РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ ПРИСТРОЮ ЖИВЛЕННЯ ТА КЕРУ- ВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПРЕСОМ

### 3.1 Вихідні дані для розрахунків

Для подальших розрахунків приймаємо такі базові параметри лінійного електромагнітного двигуна та живлення:

- робочий струм ЛЕМД у фазі накопичення -  $I_{L1}=6$  А;
- індуктивність обмотки ЛЕМД -  $L_{L1}=60$  мГн= $0,06$  Гн;
- активний опір обмотки ЛЕМД -  $R_{L1}=0,4$  Ом;
- струм утримуючого електромагніта -  $I_{L2}=1,0$  А;
- тривалість робочого імпульсу -  $t_{\text{имп}}=100$  мс;
- період ударного циклу -  $T_{\text{ц}}=0,8$  с (частота ударів приблизно  $1,25$  Гц);
- робоча випрямлена напруга:
  - коло живлення ЛЕМД:  $U_{dL1}=48$  В;
  - коло живлення утримувача:  $U_{dL2}=24$  В;
  - коло керуючого блоку:  $U_{d\text{кер}}=12$  В;
- мережа живлення: однофазна,  $U_1=220$  В,  $f=50$  Гц.

Склад елементів, що підлягають вибору і перевірці:

- R1 – резистор підлаштування у колі реле струму – 1 шт.;
- КМ1–КМ3 – реле силові – 3 шт.;
- КС1 – реле струму – 1 шт.;
- КЧ1 – реле часу – 1 шт.;
- КМ1.1–КМ2.1 – замикаючі контакти реле КМ1–КМ2 – 2 шт.;
- КМ3.1 – розмикаючий контакт реле КМ3 – 1 шт.;
- КС1.1 – розмикаючий контакт реле КС1 – 1 шт.;
- КЧ1.1 – замикаючий контакт реле КЧ1 – 1 шт.;
- SA1 – мережевий вимикач – 1 шт.;

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- SB2 – пускова кнопка – 1 шт.;
- VD1–VD8 – діоди випрямні – 8 шт.;
- FU1 – запобіжник мережевий – 1 шт.;
- T1 – силовий трансформатор (лабораторний автотрансформатор/багатообмотковий трансформатор) – 1 шт.;
- L1 – котушка головного електромагніта (ЛЕМД) – 1 шт.;
- L2 – котушка утримуючого електромагніта – 1 шт.;
- Д1 – датчик крайнього нижнього положення якоря – 1 шт.;
- ДП – датчик положення (безпеки) – 1 шт.

### 3.2 Розрахунок силового трансформатора

Після мостового випрямляча та фільтра (еквівалент великої індуктивності обмотки ЛЕМД) середня напруга на навантаженні визначається як [23-25]:

$$U_d = 1,41U_2 - 2U_D, \quad (3.1)$$

де  $U_2$  – діюче значення напруги вторинної обмотки,

$U_D$  – пряме падіння напруги на одному діоді (приймаємо  $U_D = 1$  В для силових кремнієвих діодів).

Коло живлення ЛЕМД (L1).

Необхідно отримати  $U_{dL1} = 48$  В. Тоді шукане  $U_{2L1}$ :

$$U_{2L1} = (U_{dL1} + 2U_D) / 1,41, \quad (3.2)$$

$$U_{2L1} = 48 + 21,41 \approx 35,5 \text{ В.}$$

Приймаємо стандартне значення  $U_{2L1} = 36$  В.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Постійний струм навантаження:

$$I_{dL1}=I_{L1}=6 \text{ A.}$$

За наявності ємнісного фільтра або індуктивного навантаження фактичний струм вторинної обмотки трансформатора більший від постійного.

Для мостової схеми приймаємо коефіцієнт:

$$I_{2L1}=1,6I_{dL1}, \quad (3.3)$$

$$I_{2L1}=1,6 \cdot 6 \approx 9,6 \text{ A.}$$

Потужність цієї обмотки:

$$S_{L1}=U_{2L1}I_{2L1}, \quad (3.4)$$

$$S_{L1}=36 \cdot 9,6 \approx 346 \text{ VA.}$$

Коло живлення утримуючого електромагніта ( $L_2$ ).

Для отримання  $U_{dL2}=24 \text{ V}$ :

$$U_{2L2}=(24+2)/1,41=18,4 \text{ V} \Rightarrow U_{2L2}=18 \text{ V.}$$

Струм навантаження  $I_{dL2}=1 \text{ A}$ ,

тоді струм вторинної:

$$I_{2L2}=1,6I_{dL2}, \quad (3.5)$$

$$I_{2L2}=1,6 \text{ A.}$$

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Потужність:

$$S_{L2}=18 \cdot 1,6=29 \text{ ВА.}$$

Коло живлення керуючого блоку.

Для керуючих реле, датчиків та логіки достатньо  $U_{d \text{ кер}}=12 \text{ В}$ .

Вторинна напруга:

$$U_{2 \text{ кер}}=(12+21,4)/1=9,9 \text{ В} \Rightarrow U_{2 \text{ кер}}=9 \dots 10 \text{ В.}$$

Сумарний струм котушок реле і датчиків оцінюємо:

- котушки КМ1–КМ3, КС1, КЧ1 – орієнтовно по 60...80 мА кожна;

- датчики Д1, ДП – 20...30 мА.

Прийmemo з запасом:

$$I_{d \text{ кер}}=0,5 \text{ А,} \quad (3.6)$$

$$I_{2 \text{ кер}}=1,6 I_{d \text{ кер}}, \quad (3.7)$$

$$I_{2 \text{ кер}}=0,8 \text{ А.}$$

Потужність:

$$S_{\text{кер}}=9 \cdot 0,8=7,2 \text{ ВА.}$$

Загальна потужність трансформатора:

$$S_{\Sigma}=S_{L1}+S_{L2}+S_{\text{кер}}, \quad (3.8)$$

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$S_{\Sigma}=346+29+7,2\approx 382 \text{ ВА.}$$

З урахуванням запасу (20–30 %) приймаємо трансформатор:

$$S_{T1}\geq 0,5 \text{ кВА.}$$

Отже, доцільно застосувати силовий трансформатор (або лабораторний автотрансформатор з відгалуженнями) потужністю не менше 500 ВА з трьома окремими вторинними обмотками: 36 В / 10 А; 18 В / 2 А; 9–10 В / 1 А.

### 3.3 Розрахунок і вибір діодних мостів

Діоди VD1–VD4 утворюють міст для живлення ЛЕМД (L1), а VD5–VD8 – міст кола утримувача (L2) [26, 27].

Струмове навантаження

У мостовій схемі кожний діод проводить струм приблизно половину періоду, тому середній прямий струм діода:

$$I_{F \text{ avg}} \approx I_d / 2. \quad (3.9)$$

З урахуванням імпульсного характеру режиму та запасу приймаємо допустимий струм діодів:

$$I_{F \text{ доп}} \geq 1,8 I_d. \quad (3.10)$$

Для ЛЕМД:

$$I_{dL1} = 6 \text{ А.}$$

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Тоді:

$$I_{F \text{ доп}} \geq 10,8 \text{ А.}$$

Для утримувача:

$$I_{d L2} = 1 \text{ А} \Rightarrow I_{F \text{ доп}} \geq 1,8 \text{ А.}$$

Допустима зворотна напруга.

Максимальна зворотна напруга на діоді приблизно дорівнює амплітудному значенню напруги вторинної обмотки:

$$U_{R \text{ max}} = \sqrt{2} U_2. \quad (3.11)$$

Для ЛЕМД:

$$U_{2 L1} = 36 \text{ В} \Rightarrow U_{R \text{ max}} \approx 51 \text{ В.}$$

Для утримувача:

$$U_{2 L2} = 18 \text{ В} \Rightarrow U_{R \text{ max}} \approx 25,5 \text{ В.}$$

Приймаємо стандартний запас у 3–4 рази, тому вибираємо діоди:

$$U_{RRM} \geq 200 \text{ В.}$$

Таким чином, для VD1–VD4 доцільно використати силові кремнієві діоди або готовий діодний міст на струм не менше 10–15 А та допустиму зворотну напругу 200–400 В (наприклад, мостовий випрямляч типу КЦ405, КВРС10xx тощо).

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Для VD5–VD8 достатні діоди на струм 3–5 А і напругу 200 В (тип КД213, 1N5404–1N5408 або аналог).

### 3.4 Розрахунок резистора у колі реле струму

Реле струму КС1 включене послідовно в коло живлення ЛЕМД і реагує на досягнення струмом заданого значення (6 А). Резистор R1 використовується для тонкого налаштування порогу спрацювання і часткового обмеження стрибка струму.

Нехай потрібне додаткове падіння напруги на резисторі при струмі 6 А складає приблизно 1...1,5 В:

$$U_{R1}=1...1,5 \text{ В.}$$

Тоді опір:

$$R_1=U_{R1}/I_{L1}, \quad (3.12)$$

$$R_1=(1...1,5)/6=0,17...0,25 \text{ Ом.}$$

Прийmemo стандартне значення:

$$R_1=0,22 \text{ Ом.}$$

Розсіювана потужність на резисторі в момент максимального струму:

$$P_{R1}=I_{L1}^2 R_1, \quad (3.13)$$

$$P_{R1}=62 \cdot 0,22 \approx 7,9 \text{ Вт.}$$

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						51
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

З урахуванням імпульсного режиму та запасу за потужністю обираємо резистор не менше ніж на 15–20 Вт, наприклад дротяний або керамічний потужний резистор.

### 3.5 Вибір реле та комутаційних контактів

Котушки реле живляться від кола керування (12 В) [29].

Визначимо мінімальні вимоги:

- напруга котушки:  $U_{\text{кoйл}}=12 \text{ В DC}$ ;
- струм котушки: 50–80 мА (типове значення для малогабаритних силових реле);
- контакти КМ1, КМ2, КМ3 комутують кола живлення ЛЕМД та утримувача, тому мають витримувати постійний струм не менше:
  - для ЛЕМД:  $I_{\text{конт L1}} \geq 6 \text{ А}$ ;
  - з урахуванням пускових імпульсів та запасу – не менше 10 А при напрузі 48–60 В DC.

Отже, для КМ1–КМ3 доцільно застосувати реле з контактами на 10–16 А при 60 В DC (можна використовувати автомобільні реле 12 В / 30 А, або промислові реле типу РЕК, Finder, Omron тощо). Контакти КМ1.1–КМ2.1 та КМ3.1 повинні мати таку ж або більшу струмову вантажопідйомність.

Реле струму КС1, відповідно до схеми, включене послідовно в силове коло і повинно пропускати до 6 А постійного струму без перегріву, спрацьовуючи при струмі 5,5–6 А. Для таких умов обирають спеціалізовані реле струму з відповідним діапазоном спрацювання або модульний електромагнітний розчіплювач. Налаштування порогу виконується змінним резистором R1.

Реле часу КЧ1 працює в колі керування і комутує лише струм котушки силового реле (декілька десятків міліампер), тому вимоги до контактів невисокі. До-

статньо 1–2 А при 24–60 В DC. Основна вимога – можливість регулювання затримки в межах 20–100 мс для забезпечення гарантійного «заводнення» утримуючого електромагніта L2 до подачі живлення на L1.

### 3.6 Вибір мережевого запобіжника та вимикача

Сумарна потужність, споживана всією установкою, не перевищує [30, 31]:

$$P_{\Sigma} \approx S_{\Sigma} \cdot \eta \approx 380 \text{ Вт}, \quad (3.14)$$

де  $\eta=0,9$  – ККД трансформатора та випрямлячів.

Струм у первинній обмотці трансформатора:

$$I_1 = P_{\Sigma} / U_1 \eta, \quad (3.15)$$

$$I_1 = 380 / 220 \cdot 0,9 \approx 1,9 \text{ А.}$$

Тому номінальний струм запобіжника:

$$I_{FU1} = 2,0 \dots 2,5 \text{ А.}$$

З огляду на пускові струми трансформатора доцільно застосувати запобіжник «повільної» дії (тип Т) на 2,5 А. Вимикач SA1 слід вибрати за номінальним струмом не менше 6 А при 250 В AC із запасом.

### 3.7 Оцінка енергетичних параметрів ЛЕМД

Для повноти розрахунків оцінимо запас магнітної енергії в обмотці ЛЕМД при досягненні струму 6 А:

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						53
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$W_{\text{маг}}=L_{L1}I_{L1}^2/2, \quad (3.16)$$

$$W_{\text{маг}} = 12 \cdot 0,06 \cdot 62 = 0,03 \cdot 36 = 1,08 \text{ Дж.}$$

Ця енергія перетворюється у кінетичну енергію руху якоря і, надалі, у енергію удару. Завдяки режиму статичного індуктивного накопичення та відключенню утримувача при струмі 6 А забезпечується формування достатнього енергетичного імпульсу при відносно невеликій потужності джерела живлення.

### 3.8 Узагальнення результатів розрахунку

Виконані розрахунки елементів схеми живлення та керування показують, що:

- трансформатор Т1 повинен мати три вторинні обмотки 36 В / 10 А, 18 В / 2 А і 9–10 В / 1 А, сумарною потужністю не менше 0,5 кВА;
- діодні мости VD1–VD4 та VD5–VD8 мають витримувати прямі струми відповідно не менше 10–15 А і 3–5 А та зворотну напругу не менше 200 В;
- резистор R1 із опором 0,22 Ом і потужністю 15–20 Вт забезпечує налаштування порогу спрацювання реле струму КС1 на рівні 6 А;
- силові реле КМ1–КМ3 та їх контакти повинні бути розраховані на струм не менше 10 А при напрузі до 60 В DC, що забезпечує надійну комутацію кіл L1 та L2;
- реле струму КС1, реле часу КЧ1, датчики Д1 і ДП та елементи керуючого блоку за струмовими й напруговими параметрами узгоджені з напругою 12 В;
- мережевий запобіжник FU1 номіналом 2,5 А типу «повільний» разом із вимикачем SA1 на 6 А забезпечують захист й безпечне підключення установки до мережі 220 В.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						54
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, підібрані значення елементів дозволяють реалізувати заданий режим статичного індуктивного накопичення енергії, гарантувати необхідну енергію удару ЛЕМД та забезпечити надійну й безпечну роботу електромагнітного пресу.

### 3.9 Висновки до третього розділу

У третьому розділі проведено повний аналіз і розрахунок елементів пристрою живлення та керування електромагнітним пресом, що працює в режимі статичного індуктивного накопичення енергії. На основі вихідних електричних характеристик лінійного електромагнітного двигуна та утримуючого електромагніта сформовано вимоги до елементної бази та визначено параметри силових і керуючих кіл.

Розрахунок силового трансформатора підтвердив необхідність використання багатообмоткової конструкції, здатної забезпечувати окремі рівні напруг і струмів для живлення ЛЕМД, утримуючого пристрою та керуючого блоку. Вибір діодних випрямлячів здійснено на основі аналізу імпульсних навантажень, з урахуванням необхідного запасу за струмом і зворотною напругою, що забезпечує надійну роботу схеми навіть у режимах підвищеного навантаження.

Розрахунки резистора в колі реле струму дали змогу визначити параметри елемента, який забезпечує стабільне й точне спрацювання захисту за струмом. Аналіз вимог до комутаційних реле показав, що вони повинні бути придатними до роботи в імпульсних колах постійного струму та витримувати підвищені динамічні навантаження, які виникають у процесі роботи ЛЕМД. Реле часу та датчики обрані з урахуванням особливостей керування фазами накопичення енергії та ударного ходу.

Також обґрунтовано параметри мережевого захисту - запобіжника та вимикача, які відповідають вимогам безпеки та забезпечують захист від перевантажень і коротких замикань. Додатково оцінено енергетичні можливості ЛЕМД у

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

режимі накопичення магнітної енергії, що підтвердило доцільність використання режиму статичного утримування якоря для підвищення енергії удару без збільшення встановленої потужності живлення.

Узагальнюючи результати, можна зазначити, що виконані розрахунки підтверджують правильність вибору структурної та елементної схеми пристрою живлення й керування, а також забезпечують необхідний рівень надійності, енергоефективності та безпеки роботи електромагнітного пресу в заданих експлуатаційних умовах.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						56
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

У ході виконання магістерської роботи було розроблено, обґрунтовано та досліджено пристрій живлення та керування електромагнітним пресом з підвищеними енергетичними характеристиками, що працює на основі лінійного електромагнітного двигуна (ЛЕМД) та електромагнітного утримувача. Результати кожного з розділів комплексно підтверджують ефективність обраних технічних рішень та узгодженість структурної, конструктивної і схемотехнічної частин.

У першому розділі сформовано науково-технічні передумови розробки блоку живлення та керування. На основі аналізу фізичних принципів роботи ЛЕМД, сучасних конструктивних рішень та існуючих способів формування ударних імпульсів визначено ключові вимоги до системи живлення: забезпечення режиму статичного індуктивного накопичення енергії, можливість точного керування струмом у силовій обмотці, застосування окремого електромагнітного утримувача та необхідність синхронної роботи двох електромагнітів. Проведений огляд патентних рішень підтвердив доцільність обраного підходу та дозволив сформулювати вимоги до подальшої структурної та схемотехнічної реалізації.

У другому розділі розроблено структурну схему пристрою та обґрунтовано архітектуру блоку живлення і керування. Визначено доцільність поділу системи на три основні підсистеми: коло живлення ЛЕМД, коло живлення електромагнітного утримувача та керуючий блок низьковольтної автоматики. Показано, що така структура забезпечує точне формування часових інтервалів, контроль струму, логічну послідовність увімкнення силових вузлів та безпечне завершення циклу. На основі структурних рішень розроблено повну електричну схему та виготовлено робочий зразок блоку живлення і керування у компактному корпусі, що містить усі необхідні силові та керуючі елементи.

У третьому розділі виконано повний схемотехнічний та електричний розрахунок елементів блоку живлення та керування. Проведений аналіз підтвердив

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

правильність вибору багатовивідного силового трансформатора, діодних випрямлячів, комутаційних реле, елементів захисту та резисторів у колі реле струму. Розрахунки встановили, що система здатна формувати стабільний імпульс струму та забезпечувати необхідну енергію удару ЛЕМД при дотриманні обмежень по нагріванню, струмових перевантаженнях та зворотній напрузі. Визначені параметри енергетичного режиму підтвердили, що блок живлення коректно забезпечує процес накопичення магнітної енергії й керує моментом відключення утримувача.

Таким чином, розроблений блок живлення та керування повністю відповідає вимогам, визначеним у теоретичній частині, та забезпечує отримання високих енергетичних характеристик електромагнітного пресу, що дозволяє рекомендувати конструкцію для практичного застосування та подальших експериментальних досліджень.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						58
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Linear drives in metal forming machines and peripherals // Journal of Manufacturing Processes. 2016. Vol. 21. P. 55–70. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1526612516300159>

2. Zhang J., Li X., Chen W. Applied research status and its key technologies development of the electromagnetic linear actuator // Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Advanced Materials for Science and Engineering. 2016. P. 389–394.

3. Лукавенко В.П., Зілінський А.І. Основи промислового електроприводу : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 268 с.

4. Jiles, D. Introduction to Magnetism and Magnetic Materials. 3rd ed. CRC Press, 2016. ISBN: 9781466513195.

5. Виробничі електромеханічні комплекси: практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньої програми «Електричні машини і апарати» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В. В. Чумак, М. А. Коваленко, С. С. Цивінський. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,23 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 53 с.

6. Навчальний посібник з дисципліни "Електротехніка та електропостачання" для студентів спеціальності 185 «Нафтогазова інженерія та технології». – Полтава: ПолтНТУ, 2019. – 177 с.

7. Клименко Л. П. Элементы электронных систем керування автомобільними двигунами : [навч. посібник для студентів вищих навчальних закладів] / Л. П. Клименко, О. Ф. Прищепов, В. І. Андреев, В. Ю. Голдун. – Николаїв : Вид-во ЧДУ імені Петра Могили, 2013. – 132 с. – ISBN 978-966-336-289-2.

8. А.с. № 1558545 Електромагнітний прес. – 1990. - №15.

9. А.с. № 1357110 Електромагнітний прес. – 1987. - №45.

10. А.с. № 734911 Електромагнітний прес. – 1981. - №19.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

11. А.с. № 1294446 Електромагнітний прес. – 1987. - №9.
12. А.с. № 844116 Електромагнітний прес. – 1981. - №25.
13. А.с. № 821018 Електромагнітний прес. – 1981. - №14.
14. Возняк, О.М., Штуць. А.А., Колісник М.А. Сучасні системи електроприводів. Теорія та практика. Частина 1. / Навчальний посібник. – Вінниця: ТВОРИ, 2021. – 280 с.
15. Видмиш А А. Теорія електропривода. Курсове та дипломне проектування. Самостійна та індивідуальна робота студентів: навчальний посібник / А А. Видмиш, С М. Бабій, В В. Петрусь. – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 96 с.
16. Матвійчук В А., Стаднік М І., Рубаненко О О. Електропривод виробничих машин і механізмів. Навчальний посібник з виконання курсової роботи для спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». / Вінниця: ВНАУ, 2016.- с.92.
17. Технічні засоби автоматизації / [В. В. Ткачов, М. І. Стадник, В. І. Шенченко та ін.]. – Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 2018. – 142 с.
18. Панкратов А.І. Системи керування електроприводами. Видання 2: Навч. посібник з дисципліни «Сис теми керування електроприводами» (для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерноінтегровані технології» денної і заочної форми навчання)/ – Краматорськ: ДДМА, 2018. – 225 с.
19. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: Навч.посібник / М.Г.Поповіч, О.Ю.Лозинський, В.Б.Клепиков та ін.; За ред. М.Г.Поповіча, О.Ю.Лозинського. – К.: Либідь, 2005. – 680 с.
20. Савченко І.Д. Приводи систем керування [Текст]: навч. посіб./ І.Д. Савченко.–Д.: РВВ ДНУ, 2014. – 112 с.
21. Теорія електропривода [Електронний ресурс]: методичні вказівки до виконання практичних завдань / уклад.: Г.М. Голенков, Р.П. Бондар. – Київ : КНУБА, 2025. – 24 с.
22. Структурна схема [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%82%D1%80%D1%83%D0%BA%D1>

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк. 60
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

82%D1%83%D1%80%D0%BD%D0%B0\_%D1%81%D1%85%D0%B5%D0%BC%D0%B0.

23. Розрахунок силового трансформатора [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://studfile.net/preview/5411196/page:7/>

24. Вибір оптимальної потужності силового трансформатора [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://termobud.com.ua/ua/news/vibor-optimalnoy-moshchnosti-silovogo-transformatora.html>.

25. Розрахунок параметрів трансформатора [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://old-zdia.znu.edu.ua/gazeta/FOS\\_KR.pdf](https://old-zdia.znu.edu.ua/gazeta/FOS_KR.pdf)

26. Як розрахувати діоди для мосту [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://tingki.lital.v.ua/articles/jak-rozrahuvati-diodi-dlja-mostu.html>

27. Як підібрати діод і чим вони відрізняються? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://220-energy-380.com/ua/a273389-kak-podobrat-diod.html?srsId=AfmBOop-2zmv4th6ZIEst4f3sFMJRRwD1mphrXjLlBt617bXyJNYgWsT>

28. Розрахунок параметрів резисторів та їх вибір [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://e-tk.lntu.edu.ua/pluginfile.php/7188/mod\\_resource/content/1/%D0%9F%D0%A0%D0%90%D0%9A%D0%A2%D0%98%D0%A7%D0%9D%D0%95%20%D0%97%D0%90%D0%9D%D0%AF%D0%A2%D0%A2%D0%AF%201.pdf](https://e-tk.lntu.edu.ua/pluginfile.php/7188/mod_resource/content/1/%D0%9F%D0%A0%D0%90%D0%9A%D0%A2%D0%98%D0%A7%D0%9D%D0%95%20%D0%97%D0%90%D0%9D%D0%AF%D0%A2%D0%A2%D0%AF%201.pdf)

29. Реле напруги: види, класифікація, переваги, особливості вибору [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://vse-e.com/ua/novosti/rele-napriazheniia-vidy-klassifikatsiia-dostoinstva-osobennosti-vybora?srsId=AfmBOoq7789ENphPRKvovskR5qjeQbkURUvX4YwRP9189Mgs0rlUYU-3>

30. Вибір електричних апаратів захисту в мережах до 1000 В. Навчально - методичний посібник до практичних занять та самостійної роботи з дисципліни “Електричні апарати” (для студентів 3 - 4 курсів денної та заочної форм навчання)

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						61
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

спеціальності 6.090603 "Електротехнічні системи електроспоживання"). Укл.:  
В.М.Буряк, Н.А. Дейнеко. - Харків: ХНАМГ, 2007. – 62 с.

31. Буряк В.Н., Дейнеко Н.А. Електричні апарати: Навчально - методичний  
посібник до лабораторного практикума.- Харків: ХНАМГ, 2007.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						62
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						63
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		