

Хмельницький національний університет

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

### Розробка електромагнітного пресу 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

Тхоржевський Д.В.  
Ініціали, прізвище

Керівник

Підпис, дата

проф. Поліщук О.С.  
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер

Підпис, дата

С.І. Пушицький  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Підпис, дата

доц. Неймак В.С.  
Ініціали, прізвище

Зав. кафедри МАЕЕС

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.

10 . 12 . 2025р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Тхоржевський Дмитро Віталійович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка електромагнітного пресу 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 лінійних електричних двигунів

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 електромагнітного пресу з підвищеними енергетичними характеристиками. 3. Розрахунки, що підтверджують працездатність пресу з ЛЕМД з електромагнітним утримувачем. Висновки. Перелік джерел посилання.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) Аркуш 1. Електромагнітний прес. Документ оглядовий (A1). Аркуш 2. Схеми електричних утримувачів. Документ оглядовий (A1). Аркуш 3. Основні етапи операції вирубування. Документ технологічний (A1). Аркуш 4. Електромагнітний прес з утримувачем. Схема структурна (A1). Аркуш 5. Електромагнітний прес з електромагнітним утримувачем. Складальне креслення (A1). Аркуш 6. Електромагнітний утримувач. Розрахунки (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 електромагнітного пресу з підвищеними енергетичними характеристиками	до 15.11.24р.	
3. Розрахунки, що підтверджують працездатність пресу з ЛЕМД з електромагнітним утримувачем	до 17.11.24р.	
4. Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу	до 12.12.24р.	

Студент

  
Підпис

Д.В. Тхоржевський  
Ініціали, прізвище

Керівник роботи

  
Підпис

О.С. Поліщук  
Ініціали, прізвище

# АНОТАЦІЯ

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

1. Прізвище, ім'я та по батькові Тхоржевський Дмитро Віталійович

2. Тема магістерської роботи Розробка електромагнітного пресу з підвищеними енергетичними характеристиками

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

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 6 арк., сторінок записки 64

Лінійні електромагнітні двигуни з режимом накопичення енергії та електромагнітним утримувачем якоря становлять перспективну альтернативу, оскільки забезпечують пряме перетворення електричної енергії у поступальний рух, мінімізують механічні втрати, працюють з високою швидкістю та споживають енергію лише під час формування робочого імпульсу. Завдяки цьому такі приводи є ефективним рішенням для операцій вирубування й перфорування, що потребують точного силового профілю та мінімального часу контакту. Тому розроблення пресового обладнання на основі ЛЕМД із електромагнітним утримувачем є актуальним завданням, спрямованим на підвищення енергоефективності, надійності та технологічної адаптивності сучасного обладнання для легкої промисловості.

В магістерській роботі розроблено конструкцію електромагнітного пресу з підвищеними енергетичними характеристиками. В першому розділі зроблено огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи. В другому здійснено розробку електромагнітного пресу з підвищеними енергетичними характеристиками. В третьому розділі виконано розрахунки, що підтверджують працездатність пресу з ЛЕМД з електромагнітним утримувачем.

Підпис студента \_\_\_\_\_

" 10 " 12 20 25 р.

## РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 1 від " 18 " 12 20 25 р.

Оцінка проекту ЕК Водити 1А/100

Рекомендації ЕК впровадження у виробництво процес

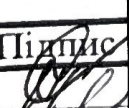

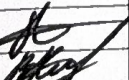

Особливі відмітки -

Технічний секретар Береза А.В.

" 18 " 12 20 25 р.

# ЗМІСТ

	стор.
Вступ	6
1 Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи	
1.1 Загальна характеристика технологічних операцій легкої промисловості, при виконанні яких застосовується обладнання ударної та пресової дії	8
1.2 Характеристика технологічних операцій вирубування та перфорування деталей в легкій промисловості	12
1.3 Порівняння приводів обладнання ударної та пресової дії, яке застосовується для виконання технологічних операцій легкої промисловості	16
1.4 Огляд схем утримування якоря лінійних електромагнітних двигунів	22
<del>1.5</del> Висновки до першого розділу	29
2 Розробка електромагнітного пресу з підвищеними енергетичними характеристиками	31
2.1 Обґрунтування вибору конструктивної схеми пресового обладнання з ЛЕМД із електромагнітним утримувачем	31
2.2 Розробка структурної схеми електромагнітного пресу з підвищеними енергетичними характеристиками	33
2.3 Вихідні дані електромагнітного пресу з підвищеними енергетичними характеристиками	35
2.4 Розробка конструкції електромагнітного пресу з підвищеними енергетичними характеристиками	38

MPMA25.00.00.000 ПЗ								
Вм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата	Розробка електромагнітного пресу з підвищеними енергетичними характеристиками Пояснювальна записка	Літера	Аркуш	Аркушів
Виконав	Гхоржевський					М	4	64
Перевір.	Поліщук					ХНУ		
Н.контр.	Пучиня					гр.ЕТм-24-1		
Затвер.	Неймак							

2.5	Загальний вигляд електромагнітного пресу з електромагнітним утримувачем	42
2.6	Принцип роботи електромагнітного пресу з підвищеними енергетичними характеристиками	45
<del>2.7</del>	Висновки до другого розділу	47
3	Розрахунки, що підтверджують працездатність пресу з ЛЕМД з електромагнітним утримувачем	49
3.1	Розрахунок геометричних параметрів електромагнітного утримувача	49
3.2	Розрахунок навантаження на робочі деталі	54
<del>3.3</del>	Висновки до третього розділу	58
	Висновки	60
	Перелік джерел посилання	62
	Додаток А	

## ВСТУП

Енергія, і передусім електрична, є одним із ключових ресурсів індустріального суспільства, оскільки забезпечує роботу більшості технологічних процесів, машин та механізмів сучасної промисловості. Подібно до інших природних ресурсів, енергетичні ресурси мають тенденцію до виснаження, тому їх раціональне використання та зменшення втрат набуває особливого значення для економічного розвитку. Енергозбереження виступає пріоритетним напрямом державної політики України, оскільки значна частина паливно-енергетичних ресурсів імпортується, а це формує залежність від зовнішніх постачальників та створює стратегічні ризики для національної енергетичної безпеки. За даними міжнародних аналітичних досліджень, потенціал енергоефективності може становити понад 40–45 % загального обсягу споживання енергоресурсів, що підтверджує необхідність впровадження нових технологій та модернізації обладнання на всіх промислових рівнях [1].

Однією з ключових причин перевитрат електричної енергії в промисловості є функціонування технічно застарілого обладнання та електроприводів, які працюють у нерегульованих режимах із низьким коефіцієнтом завантаження. Значна частина електромеханічних приводів експлуатується у режимах, що не відповідають їх номінальним характеристикам, унаслідок чого виникають значні активні та реактивні втрати, знижується коефіцієнт корисної дії та ефективність технологічних процесів. Ускладнення виробництва, поява енергоємних технологічних операцій та зростання вимог до надійності й точності машин зумовлюють необхідність переходу до енергозберігаючих систем електропривода, здатних забезпечувати економію енергії до 50 % завдяки адаптації робочих параметрів до реального навантаження.

Особливої уваги потребує пресове обладнання легкої промисловості, оскільки операції формування, вирубування, пробивання та висікання належать до

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

найбільш енерговитратних. Традиційні механічні та гідравлічні преси мають значні холості енергетичні втрати, обмежену можливість регулювання зусилля та швидкості, а також характеризуються зниженим коефіцієнтом корисної дії через наявність великої кількості механічних ланок. У цьому контексті перспективним напрямом є застосування силових приводів на основі лінійних електромагнітних двигунів, які забезпечують прямолінійний рух робочого органу, високу динаміку, точність регулювання та суттєве зниження енергоспоживання, оскільки споживають електроенергію виключно під час виконання технологічних операцій [2].

Тому створення електромагнітного пресу з підвищеними енергетичними характеристиками, у якому як силову частину використано лінійний електромагнітний двигун, є актуальним завданням сучасної інженерії. Для підвищення силових параметрів, компенсації зрушування та покращення якості процесу вирубвання доцільним є застосування електромагнітного пристрою утримування, що забезпечує штучне затримування якоря на початковому етапі руху та формування додаткового імпульсу зусилля у потрібний момент робочого циклу. Використання такої конструкції дозволяє мінімізувати непродуктивні витрати електроенергії, підвищити точність позиціонування, покращити якість обробки матеріалів та забезпечити високу енергоефективність пресового обладнання.

Таким чином, актуальність теми магістерської роботи визначається необхідністю розробки нового електромагнітного пресу з поліпшеними енергетичними характеристиками, здатного працювати у складі сучасних автоматизованих виробничих систем легкої промисловості, забезпечувати точність технологічних операцій та значно зменшувати рівень споживання електричної енергії.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

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

## 1.1 Загальна характеристика технологічних операцій легкої промисловості, при виконанні яких застосовується обладнання ударної та пресової дії

Технологічні процеси легкої промисловості охоплюють широкий спектр операцій, націлених на обробку матеріалів різної природи та структури, що використовуються у виробництві взуття, одягу, галантерейних виробів, технічного текстилю та полімерних комплектуючих. Суттєвою особливістю цих процесів є необхідність точного та контрольованого силового впливу на матеріал, який може мати різні фізико-механічні характеристики, включно з анізотропією, неоднорідністю, шаруватістю, пружністю, пластичністю та різною реакцією на локальні навантаження. У зв'язку з цим обладнання ударної та пресової дії є ключовим елементом технічного оснащення підприємств легкої промисловості, забезпечуючи можливість виконання технологічних операцій, що потребують концентрації зусилля у визначеній зоні контакту та його точного дозування відповідно до властивостей заготовки [3].

У виробництві взуття процеси вирубування й висікання деталей займають одну з центральних позицій, оскільки від точності цих операцій залежить посадка, міцність та якість готового виробу. До типових операцій належать вирубування деталей верху взуття, підноска, жорстких і напівжорстких підсилювальних елементів, вкладних устілок, підошовних елементів і декоративних частин. Оброблювані матеріали можуть включати натуральну шкіру, штучну шкіру, мікрофібру, термопластичні полімери, гуми та багатошарові клеєні структури, кожна з яких по-різному реагує на локальний механічний вплив. Такі матеріали вимагають точного контролю швидкості взаємодії інструмента з поверхнею, величини зусилля та характеру імпульсу. При цьому навіть незначне перевищення необхідного рівня навантаження може спричинити появу заломів, розривів волокон чи порушення

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

геометрії краю, а недостатній рівень зусилля - неповне прорізання чи дефекти контуру заготовки.

У текстильному та швейному виробництві обладнання ударної та пресової дії використовується під час пробивання технологічних отворів, штампування ущільнювальних елементів, вирізання деталей складної форми, виготовлення багат шарових пакувальних чи формоутворювальних компонентів. Текстильні матеріали мають виражену анізотропію властивостей залежно від напрямів ниток основи й утку, тому нерівномірний або надмірний удар може призвести до руйнування структури плетіння, утворення мікротріщин, зміщення шарів або ослаблення межових зон. Як зазначають українські дослідники легкої промисловості, навіть невеликі відхилення у швидкості руху бойка чи штампа можуть істотно впливати на якість крайових зон текстильних заготовок та спричинити подальші дефекти продукції [4],

У галантерейній промисловості, де значна частка виробів виготовляється з багат шарових композитних матеріалів, штучної шкіри, еластомерів, полімерних листових структур та комбінованих текстильних матеріалів, пресове та ударне обладнання виконує завдання формування та вирубування декоративних елементів, пробивання складних контурів, штампування поверхневих структур і нанесення тиснення. Тут вимоги до точності та стабільності навантаження особливо високі, оскільки зміни товщини чи щільності матеріалу в межах одного виробу можуть бути значними. Тому традиційні механічні приводи з фіксованою кінематикою часто обмежені у можливостях адаптації до змінюваних умов, що створює підґрунтя для впровадження більш універсальних систем з можливістю керування силовими параметрами.

Для полімерних матеріалів та композицій, які широко використовуються у виготовленні підошовних конструкцій, амортизувальних елементів, захисних вставок та устілок, характерною є залежність механічних властивостей від температури, швидкості деформації та величини навантаження. У таких умовах облад-

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

нання пресової дії повинно забезпечувати не лише рівномірність контактного зусилля, але й високу чутливість до зміни параметрів циклу. Гідравлічні преси здатні створювати великі сили, проте їх інерційність та обмежена швидкодія ускладнюють виконання високоточних висікальних чи формоутворювальних операцій, де тривалість контакту має бути мінімальною. У той же час механічні ексцентрикові преси, хоч і забезпечують високу повторюваність циклу, споживають значні обсяги енергії на розгін інерційних елементів та не допускають гнучкого налаштування профілю руху робочого органу.

Важливою характеристикою технологічних операцій ударного та пресового типу у легкій промисловості є циклічність. Робочий цикл складається з підведення робочого органу, формування зусилля, короткочасного контакту з матеріалом та повернення у початкове положення. Багато традиційних систем витрачають енергію на всіх етапах циклу, включно з холостими ходами, що призводить до збільшення питомого енергоспоживання. Це особливо критично в умовах сучасного виробництва, орієнтованого на підвищення енергоефективності та зниження експлуатаційних витрат.

Згідно з аналітичними матеріалами українських фахових видань, одним із ключових недоліків частини існуючого обладнання є низька ефективність використання встановленої механічної потужності. Це зумовлено тим, що робоче обладнання часто функціонує за принципом постійної готовності до удару чи пресування, а не лише в момент виконання операції. Підтримка тиску у гідросистемах, робота двигуна з ексцентриковим механізмом або обертання маховика в механічних пресах потребують безперервного енергозабезпечення, що підвищує експлуатаційні витрати та ускладнює забезпечення енергетичної ефективності виробництва [4].

У контексті сучасних технологічних і виробничих вимог усе більшої актуальності набуває застосування електромагнітних та лінійних приводних систем у обладнанні ударної та пресової дії. Лінійні електроприводи забезпечують прямо-

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

лінійний рух без проміжних механічних перетворень, що суттєво знижує інерційність приводу та підвищує точність контролю параметрів робочого циклу. На відміну від традиційних приводів, електромагнітні системи можуть брати електроенергію лише в момент виконання технологічного впливу, що забезпечує суттєве зменшення енергоспоживання та дозволяє оптимізувати витрати при масовому виконанні циклічних операцій.

Крім того, сучасні дослідження вітчизняних науковців у сфері машин легкої промисловості свідчать, що застосування електромагнітних пристроїв утримання та керованих електромагнітних імпульсів дозволяє отримати форму силового профілю, оптимізовану для конкретного матеріалу. Наприклад, імпульсне силове навантаження з попереднім утриманням якоря дозволяє уникнути передчасного ковзання штампа по поверхні заготовки та забезпечує більш чистий і чіткий контур різання. Це особливо важливо у процесах обробки шаруватих матеріалів, у яких існує ризик зміщення шарів при недостатньо різкому прикладанні зусилля.

Загалом технологічні процеси легкої промисловості, які базуються на діях удару або пресування, характеризуються високими вимогами до точності дозування зусилля, повторюваності циклу, адаптивності до змінюваних властивостей матеріалу та ефективності використання енергії. Аналіз існуючих підходів, описаних у вітчизняних наукових публікаціях, дозволяє дійти висновку, що традиційні механічні, пневматичні та гідравлічні приводи вже не повністю відповідають вимогам сучасного виробництва, особливо в умовах підвищеної енергетичної обмеженості та необхідності забезпечення високої якості продукції [3].

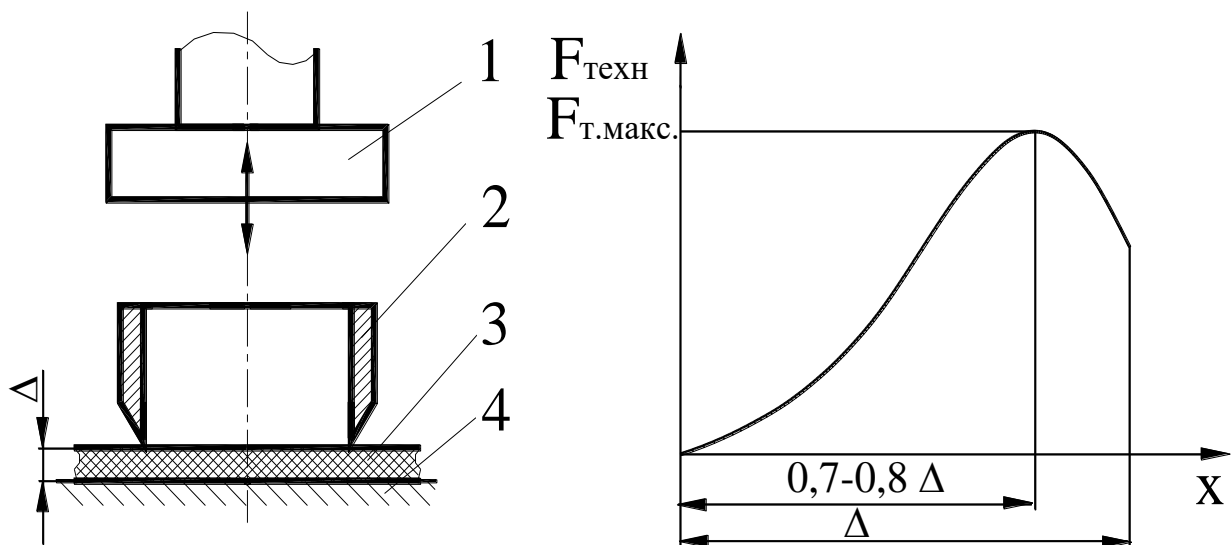
Наявність складної номенклатури матеріалів, використання композитних структур, сучасних термопластів і багатошарових тканин вимагають застосування обладнання, що здатне гнучко змінювати параметри робочого процесу та формувати точний силовий вплив у зонах контакту. Саме тому модернізація ударного та пресового обладнання на основі електромагнітних технологій із підвищеними

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						11
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

енергетичними характеристиками є актуальним напрямом розвитку технологічного оснащення легкої промисловості та створює підґрунтя для підвищення ефективності та конкурентоспроможності галузі [4].

## 1.2 Характеристика технологічних операцій вирубування та перфорування деталей в легкій промисловості

Операції вирубування та перфорування посідають одне з центральних місць у технологічних процесах легкої промисловості (рис.1.1, 1.2) [5]. Вони забезпечують формування базових конструктивних елементів із листових, рулонних, гнучких і багат шарових матеріалів, що використовуються під час виготовлення взуття, одягу, галантерейних виробів, технічного текстилю та декоративних компонентів. Саме на цих двох операціях закладається точність геометрії деталей, чистота обробки країв, рівність контурів та стабільність розмірів, що визначають якість і зовнішній вигляд готової продукції.



1 - ударник; 2 - різак; 3 - матеріал, що вирубується; 4 - плита;

$\Delta$  - товщина матеріалу.

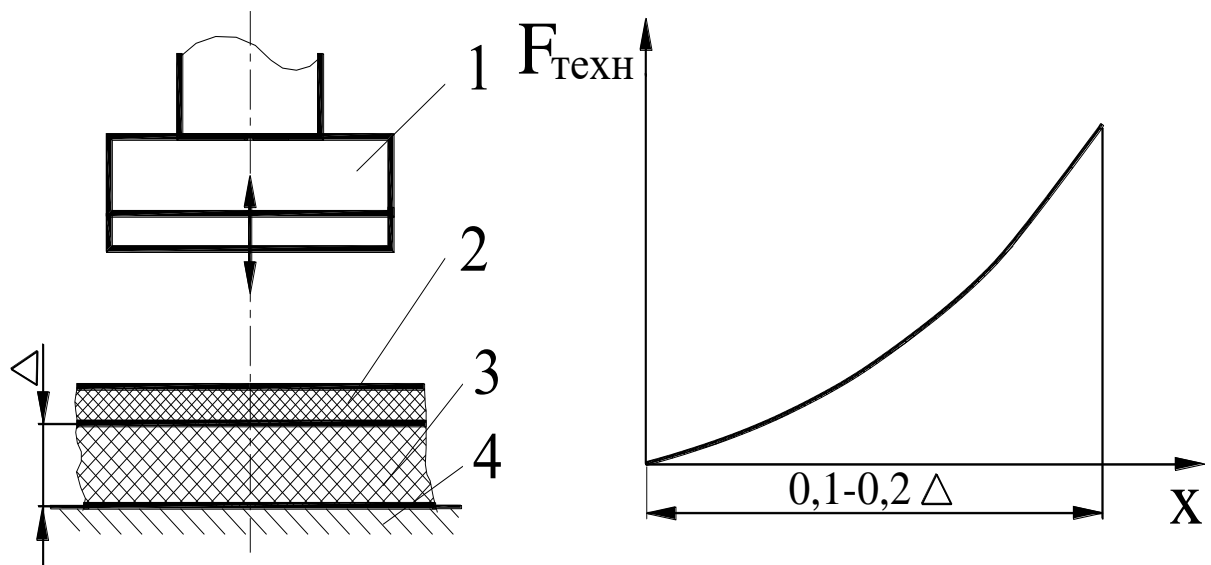
Рисунок 1.1 – Схема технологічної операції вирубування деталей взуття та характер зміни технологічного зусилля  $F_{техн}$  при зануренні різака в матеріал:

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
-----	------	---------	--------	------

МРМА25.00.00.000 ПЗ

Арк.

12



1 - ударник із прикріпленим нумератором; 2 – стрічка для фарбування; 3 - заготовка; 4 - плита;  $\Delta$  - товщина матеріалу

Рисунок 1.2 – Схема технологічної операції клеймування деталей взуття та характер зміни технологічного зусилля  $F_{\text{техн}}$  при зануренні робочого органу в матеріал

Вирубубання як технологічна операція полягає у відокремленні частини матеріалу за геометричним контуром деталі. Залежно від галузі легкої промисловості вирубубанню підлягають різноманітні деталі: елементи верху взуття, союзки, берці, підноски, задники, устілки, проміжні підсилювальні конструкції, деталі кишень, клапанів, ременів, декоративних панелей, а в галантереї - корпуси та елементи сумок, гаманців, портмоне, футлярів. Важливим є те, що вирубубання здійснюється за один технологічний цикл, і якість його виконання визначає можливість подальшої збірки виробу без додаткової ручної підгонки.

Однією з ключових особливостей вирубубання є необхідність враховувати властивості оброблюваних матеріалів. Натуральна шкіра, що широко застосовується у взутті та галантереї, має складну волокнисту структуру. Її щільність неоднорідна, а міцність залежить від напрямку розташування волокон. Ця анізотропія призводить до того, що поведінка шкіри під впливом локального навантаження

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА25.00.00.000 ПЗ

Арк.

13

може змінюватися навіть у межах одного листа. У зонах зі слабшою структурою можуть з'являтися мікротріщини, нерівномірне розтягування або розриви. Тому при вирубуванні важливо забезпечити миттєве та рівномірне руйнування структури матеріалу по всій довжині контуру, що дозволяє уникнути перекосів, хвилювих дефектів і неточностей.

Для синтетичних матеріалів характерні інші прояви механічних властивостей. Мікрофібра, штучна шкіра, поліуретанові композиції, термоеластоласти та інші синтетичні матеріали демонструють підвищену еластичність і здатність до локального розтягування [6]. У момент вирубування ці матеріали можуть частково зміщуватися або деформуватися, що призводить до утворення неточного, «розмитого» контуру. Для полімерних листів і термопластичних структур виникає ризик пружного відскоку, що ускладнює отримання чистого краю. У багатошарових матеріалах часто спостерігається міжшарове ковзання, яке може призвести до неповного розрізання одного з шарів, порушення формату деталі або асиметрії.

У текстильних матеріалах вирубування має свої специфічні труднощі. Тканини, неткані матеріали та трикотаж мають структуру, що складається з переплєтених або хаотично орієнтованих волокон, які можуть зміщуватися під локальним навантаженням. У тканинах різного переплєтєння волокна основи й утку мають різну міцність, тому нерівномірність впливу може спричинити зсув ниток або створення контуру. Неткані матеріали, навпаки, можуть розриватися у зоні локального навантаження і формувати нерівні краї. Тому в процесі вирубування для текстилю важливо зберігати стабільний напрям прикладання силового впливу і забезпечувати мінімальні бокові деформації.

Іншою важливою операцією є перфорування - створення наскрізних отворів у матеріалі з метою отримання декоративних, функціональних або технологічних властивостей [5]. Перфорування широко застосовується у виробництві взуття, одягу та галантереї, оскільки дозволяє поліпшити повітропроникність, зменшити вагу конструкції, створити декоративні елементи або підготувати матеріали до встановлення фурнітури. Перфорація деталей взуття виконується для

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

утворення вентиляційних отворів у союзці або берці, що покращує мікроклімат всередині взуття. У верхах із натуральної шкіри декоративна перфорація формує стильні візерунки, а в елементах спортивного чи робочого взуття перфорація може забезпечувати додаткову гнучкість.

У процесі перфорування, як і у вирубуванні, важливу роль відіграють властивості матеріалу. У шкірі отвір має бути сформований через руйнування волокнистої структури, що потребує чіткої геометрії та стабільного навантаження. Порушення структури волокон або їх частковий розрив поза контуром отвора можуть призвести до зниження міцності деталі та появи дефектів під час експлуатації. У синтетичних матеріалах і еластомерах перфорування має враховувати можливість локального розтягування або пластичних деформацій, особливо якщо отвори мають малий діаметр або високу щільність розташування.

Важливим аспектом є перфорування багатошарових матеріалів, які широко використовуються у виробництві взуттєвих та швейних деталей. При перфоруванні шаруватих структур необхідно забезпечити рівномірне формування отвору через усі шари. Нерівномірність або зміщення хоча б одного шару призводить до спотворення зовнішнього вигляду, погіршує точність наступних монтажних операцій або ускладнює розміщення фурнітури.

Особливо складним є перфорування текстильних матеріалів. Тканинні волокна можуть зміщуватися або деформуватися, що призводить до овальної форми отворів або нерівного краю. Неткані матеріали можуть рватися, якщо локальний вплив є надто сильним або нерівномірним. Тому процес перфорування вимагає контролю параметрів впливу, стабільності напрямку та рівномірності силового навантаження.

Загальною вимогою для процесів вирубування та перфорування в легкій промисловості є висока повторюваність результатів. Ці операції належать до групи базових, і їх якість безпосередньо впливає на сумісність деталей у складанні, симетрію виробу, точність посадки в готовому вигляді та довговічність конструкції. Помилки, допущені на цих стадіях, зазвичай не підлягають виправленню

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

на подальших етапах і призводять до браку або втрати матеріалу, що є економічно значущим фактором.

Таким чином, операції вирубування та перфорування в легкій промисловості характеризуються комплексом технологічних, матеріалознавчих та конструктивних особливостей, які потребують точного контролю, стабільного силового впливу, дотримання геометрії та урахування структури матеріалу. Саме ці операції формують базову якість виробів і визначають їх відповідність технологічним, естетичним та експлуатаційним вимогам. Досконале володіння такими процесами є важливою умовою розвитку сучасної легкої промисловості, підвищення її ефективності та конкурентоспроможності.

### 1.3 Порівняння приводів обладнання ударної та пресової дії, яке застосовується для виконання технологічних операцій легкої промисловості

Приводи обладнання ударної та пресової дії є ключовими елементами технологічних комплексів легкої промисловості, оскільки забезпечують формування необхідного силового впливу на матеріал під час виконання операцій вирубування, перфорування, тиснення, пробивання та формування. Від вибору типу приводу залежить ефективність виробничого процесу, точність руху робочого органу, енергоефективність та надійність устаткування. У даній галузі найбільш широке застосування отримали електромеханічні, гідравлічні та пневматичні приводи, кожен з яких має свої переваги й недоліки.

Електромеханічний привід традиційно використовується у пресовому обладнанні завдяки простоті конструкції та відносно високому коефіцієнту корисної дії. Його робота базується на перетворенні обертального руху електродвигуна у зворотно-поступальний рух робочого органу через механічні передачі та кінематичні механізми. До переваг електромеханічного приводу відносять можливість плавного регулювання частоти обертання, простоту інтеграції з електронними системами керування, високу надійність та відносно низькі експлуатаційні витрати.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Проте значна кількість рухомих механічних ланок зумовлює підвищену інерційність системи, збільшення люфтів у передачах, складність забезпечення точності при високошвидкісних циклах і підвищене зношування вузлів. Робота у режимах нерівномірних навантажень негативно впливає на ресурс електродвигуна. Крім того, електромеханічний привід продовжує споживати електричну енергію навіть під час холостих ходів, коли робочий орган не здійснює корисної роботи, що значно знижує загальну енергоефективність технологічного процесу.

На рис.1.3 наведено загальний вигляд стрічкової розкрійної машини С-В2/900В-2 фірми TypeSpecial з електромеханічним приводом [7].



Рисунок 1.3 – Загальний вигляд стрічкової розкрійної машини С-В2/900В-2 фірми TypeSpecial з електромеханічним приводом

Гідравлічний привід є одним із найпотужніших рішень для пресового обладнання, оскільки здатний створювати значні зусилля при компактних розмірах виконавчого механізму. Використання рідини як робочого середовища дозволяє забезпечити плавність руху, точне дозування зусилля, безступеневе регулювання

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк. 17
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

швидкості та стійкість до перевантажень. Завдяки цим властивостям гідроприводи широко застосовуються у пресах для формування, тиснення, пробивання щільних матеріалів, а також вирубування деталей із багат шарових або товстих матеріалів. Попри це, гідравлічні системи мають істотні недоліки: складність конструкції, необхідність регулярного технічного обслуговування, наявність ризику витоків масла, чутливість до забруднення та зношування ущільнень. Такі недоліки знижують екологічність і збільшують вартість експлуатації. Крім того, гідравлічні приводи характеризуються невисокою швидкістю та підвищеною інерційністю, що обмежує їх використання у високочастотних імпульсних процесах.

На рис.1.4 приведено загальний вигляд вирубного пресу GL-12Т з гідравлічним приводом [8].



Рисунок 1.4 - Загальний вигляд вирубного пресу GL-12Т з гідравлічним приводом

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

Пневматичний привід відзначається простотою конструкції, високою швидкістю та економічністю, завдяки чому поширений у машинах з невеликими технологічними зусиллями. Його робота базується на використанні стисненого повітря, що забезпечує швидке реагування системи та довговічність компонентів. Перевагами пневматичного приводу є простота обслуговування, низька вартість експлуатації, високий ресурс роботи та добрі динамічні властивості. Разом із тим він має суттєві обмеження: низьку силову здатність, зростання габаритів при необхідності збільшення зусилля, можливість виникнення некерованих ударних навантажень через стисливість повітря, а також нижчий коефіцієнт корисної дії порівняно з гідравлічними системами. Крім того, застосування пневматичних приводів є економічно доцільним лише у разі наявності централізованої мережі подачі стисненого повітря.

На рис.1.5 наведено загальний вигляд пресу Type Special P-Q3 для встановлення фурнітури фірми з пневматичним приводом [9].



Рисунок 1.5 - Загальний вигляд пресу Type Special P-Q3 для встановлення фурнітури фірми з пневматичним приводом

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

Спільним недоліком усіх традиційних приводів є багатоступеневе перетворення енергії та необхідність функціонування окремих проміжних вузлів, що спричиняє додаткові втрати та зниження загального ККД. Для електромеханічного приводу це перетворення обертального руху в поступальний через механічні ланки; для гідравлічного - перетворення електричної енергії в гідравлічну; для пневматичного - у пневматичну, після чого - у механічну. Усі ці процеси супроводжуються втратами на тертя, гідравлічним або пневматичним опором та холостими режимами. Особливої уваги заслуговує той факт, що традиційні приводи споживають більшу частину енергії саме під час холостих ходів. Для операцій вирубування це співвідношення може досягати 70–90 % від загального часу циклу, що різко зменшує економічну ефективність роботи устаткування.

Лінійні електромагнітні двигуни, на відміну від традиційних систем, забезпечують пряме перетворення електричної енергії у поступальний рух без проміжних кінематичних чи гідропневматичних передач. Це забезпечує зниження інерційності системи, підвищення точності позиціонування та можливість генерування коротких високошвидкісних імпульсів зусилля, що є надзвичайно важливим для операцій вирубування та перфорування. ЛЕМД споживають енергію виключно під час виконання робочого імпульсу, що мінімізує втрати в холостих режимах. Відсутність рідини або стисливого газу як проміжного робочого середовища підвищує екологічність, спрощує конструкцію та зменшує потребу в регулярному технічному обслуговуванні. Компактність і мала кількість рухомих частин роблять такі двигуни перспективними для впровадження у пресове обладнання нового покоління з підвищеною енергоефективністю.

На рис.1.6 представлено загальний вигляд пресу для установки фурнітури з електромагнітним приводом [10].

Таким чином, порівняльний аналіз показує, що хоча електромеханічні, гідравлічні та пневматичні приводи залишаються широко застосовуваними у легкій

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

промисловості, вони мають низку об'єктивних недоліків, пов'язаних зі складністю конструкції, низькою енергоефективністю в циклічних режимах та значними експлуатаційними витратами.



Рисунок 1.6 - Загальний вигляд пресу для установки фурнітури з електромагнітним приводом

Лінійні електромагнітні двигуни, у свою чергу, усувають більшість цих недоліків і відкривають можливості для створення високоефективних пресових систем, здатних забезпечити оптимальний розподіл енергії, високу продуктивність, точність і надійність у виконанні технологічних операцій легкої промисловості.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## 1.4 Огляд схем утримування якоря лінійних електромагнітних двигунів

Одним із перспективних напрямів підвищення динамічних і енергетичних характеристик електромагнітних виконавчих механізмів є застосування методів штучного утримування якоря на початковому етапі робочого циклу [11, 12]. Суть такого підходу полягає у створенні в момент зрушування додаткового протидіючого зусилля, яке перешкоджає початку переміщення якоря та забезпечує зростання струму збудження до більш значного значення, ніж у звичайних режимах. За рахунок цього у магнітній системі формується більший запас електромагнітної енергії, що надалі позитивно впливає на кінетичні параметри руху якоря.

Застосування такого способу особливо важливе для лінійних електромагнітних двигунів (ЛЕМД), що використовуються як приводи машин ударної дії та пресового обладнання, де навантаження виникає в кінці ходу. У конструкціях традиційних ЛЕМД рух якоря починається при мінімальному значенні струму в обмотці, яке відповідає умовам рівноваги між початковою тяговою силою двигуна і протидіючою силою навантаження. У результаті енергія, яка запасється в системі, є недостатньою для формування великої швидкості чи значного енергетичного імпульсу удару. Це є суттєвим недоліком для процесів вирубування, перфорування та інших швидкодіючих операцій, де енергія удару безпосередньо визначає якість технологічного результату.

Для однообмоткових ЛЕМД, що застосовуються в обладнанні з навантаженням у кінці ходу, протидіюче зусилля на етапі зрушування створюється, як правило, циліндричною зворотною пружиною, що працює на стискання. Однак максимальне зусилля такої пружини зазвичай становить лише декілька відсотків від тягової сили ЛЕМД на початку ходу. Це призводить до формування незначного струму зрушування, а відповідно - недостатнього накопичення магнітної енергії в системі. Відтак ЛЕМД споживає менше енергії від джерела живлення та розвиває нижчу ударну енергію.

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

Для усунення цього недоліку застосовується пристрій утримування якоря (ПУЯ), який створює кероване протидіюче зусилля лише на початку руху. Такий пристрій має відповідати низці вимог: забезпечення значної сили опору в момент зрушування та мінімального опору в подальшій частині ходу; можливість регулювання сили утримування; низьке енергоспоживання; відсутність підвищеного шуму та механічного зношування.

#### 1.4.1 Конструктивні схеми ЛЕМД з акумулюванням магнітної енергії

Початковий етап робочого циклу ЛЕМД із накопиченням магнітної енергії пов'язаний із режимом статичного утримування якоря. У цьому режимі двигун функціонує як індуктивний накопичувач, який перетворює електричну енергію у запас магнітної енергії в обмотках і магнітному ланцюгу. Поки якір утримується від руху, рівень струму в обмотці зростає, що забезпечує збільшене магнітне поле та формування енергетичного запасу, який у подальшому трансформується в кінетичну енергію руху.

Практична реалізація цього принципу потребує застосування спеціальних утримуючих пристроїв, які створюють додаткове протидіюче зусилля на початковому етапі. Для цих цілей можуть застосовуватися механічні та електромагнітні заціпки, автономні утримувачі з постійними магнітами або електромагнітами. Елементами утримування можуть бути фіксатори різних типів, що забезпечують стабільне положення якоря до моменту збудження обмотки достатнім струмом.

У ранніх конструкціях використовувалися автономні механічні пружинні фіксатори, які утримували якір у початковому стані. Однак такі системи мали суттєві недоліки - шумність, підвищене механічне зношування, складність регулювання сили утримання. Тому у сучасних ЛЕМД частіше застосовуються електромагнітні пристрої утримування осердя, які позбавлені цих недоліків. Приклад такої конструкції подано на рис. 1.7 та у кресленні [МРМА25.00.00.000ДО].

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

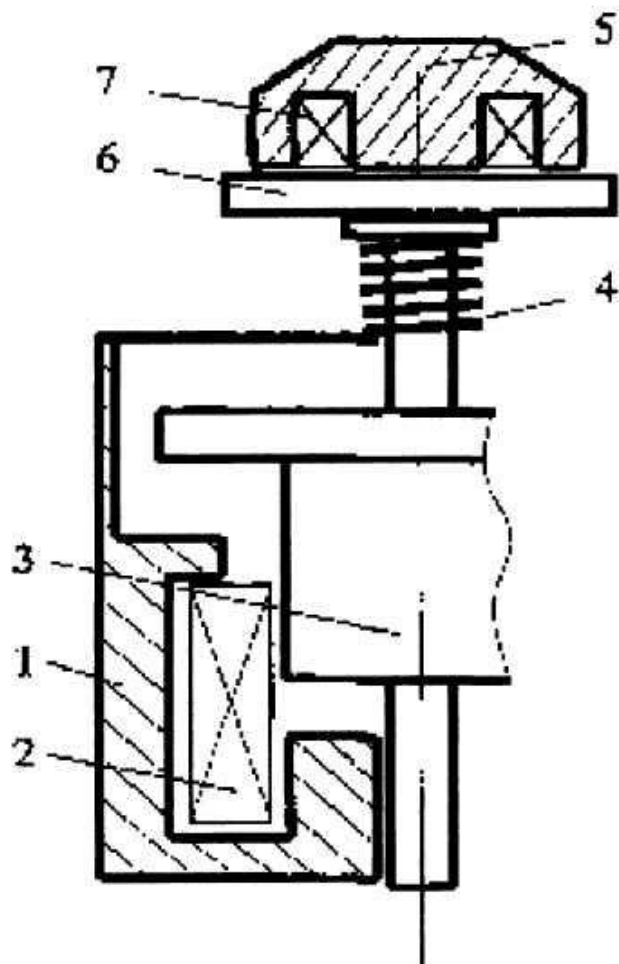


Рисунок 1.7 – Схема лінійного електромагнітного двигуна з електромагнітним утримуванням осердя

У конструкції, представлений на рисунку, утримуючий електромагніт розміщується у верхній частині ЛЕМД. Магнітопровід 1, котушка збудження 2, рухоме осердя 3 та зворотна пружина 4 утворюють основний електромагнітний механізм. Утримувач являє собою циліндричний електромагніт 5 із зовнішнім осердям 6, яке притягується при подачі струму на обмотку 7. Регулювання сили утримання здійснюється за допомогою регульованого джерела постійного струму, що забезпечує широкі можливості керування моментом початку руху.

Інший варіант конструктивного виконання наведено на рис. 1.8, де зображено ЛЕМД із безконтактним електромагнітним утримувачем.

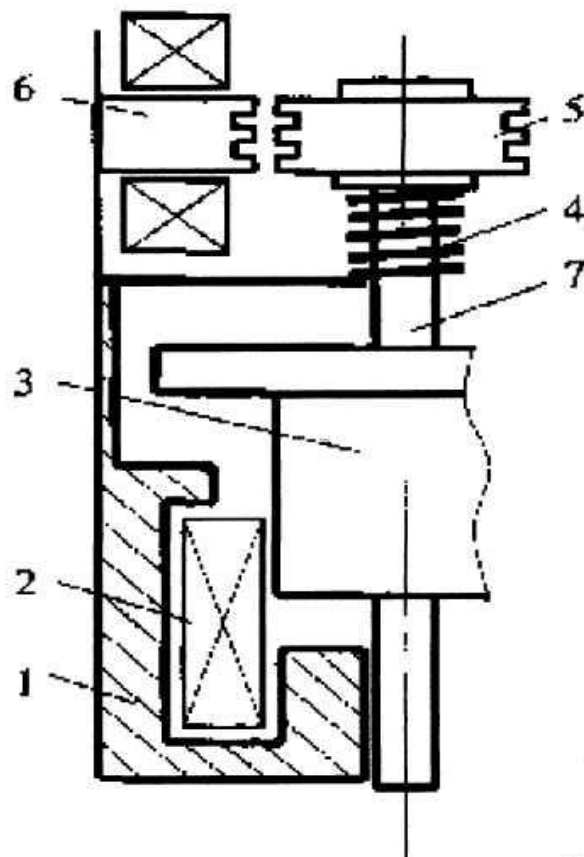


Рисунок 1.8 – Схема лінійного електромагнітного двигуна з безконтактним електромагнітним утримуванням осердя

У цій конструкції утримуючий електромагніт 6 зв'язаний зі штоком 7, що жорстко з'єднує його з основним осердям 3. Така схема забезпечує безударне повернення та усуває недоліки механічних заціпок. Проте недолік подібних рішень полягає у нерівномірному завантаженні активних матеріалів: пристрій утримання працює лише на початку ходу, тоді як решту часу магнітопровід ЛЕМД залишається незадіяним у повному обсязі.

Саме тому у новітніх конструкціях застосовуються інтегровані системи утримання, де вузли утримувача та двигуна об'єднані в єдину магнітну систему. Приклад такої конструкції наведено на рис. 1.9.



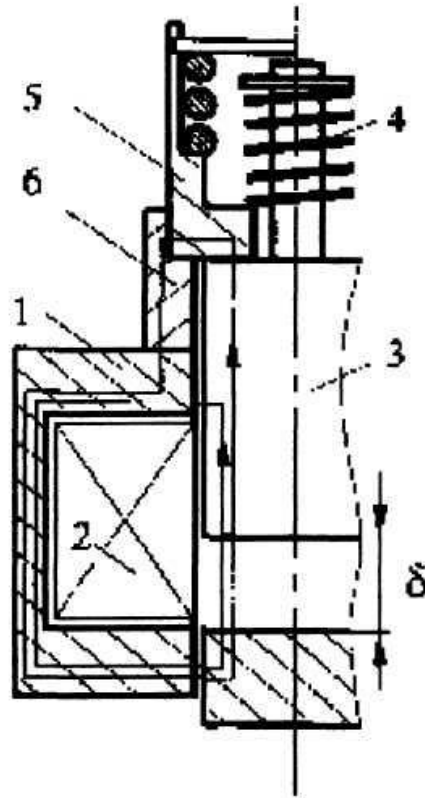


Рисунок 1.10 – Однофазовий ЛЕМД зі спільним джерелом магніторушійної сили

Двигун містить магнітопровід 1, обмотку збудження 2, якорь 3, зворотну пружину 4, феромагнітний буфер 5 та кільцевий полюс 6. У цьому виконанні в момент подачі імпульсу струму магнітний потік замикається як через робочий зазор, так і через буфер, що забезпечує утримання якоря до досягнення необхідного рівня енергії. Після насичення кільцевого полюса зусилля утримання зменшується і якорь здійснює прискорений рух до торцевої частини магнітопроводу.

Режим утримання осердя дає змогу суттєво збільшити енергію удару ЛЕМД, підвищити початковий струм і кінетичну енергію руху, що є визначальними параметрами для пресового обладнання. Однак ефективність такого режиму залежить від правильно вибраної сили утримування: занадто мала сила не забезпечить потрібного накопичення енергії, а надмірна - може призвести до блокування руху якоря.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА25.00.00.000 ПЗ

Арк.  
27

## 1.4.2 Обґрунтування вибору типу електромагнітного утримувача

За конструкцією утримувачі можуть виконуватися із застосуванням циліндричного або дискового якоря. Використання циліндричного якоря передбачає застосування циліндричної котушки, яка розміщується у трубі зворотної пружини. Проте така конструкція потребує створення ступінчастого осердя: циліндрична частина повинна входити в котушку, а дискова частина - бути опорою для пружини. Це робить конструкцію масивною, металомісткою та незручною для обслуговування. Збільшення висоти вузла погіршує доступ до деталей під час ремонту.

Натомість електромагнітний утримувач з дисковим якорем позбавлений цих недоліків. Дисковий якір виконує одночасно функцію робочої поверхні для утримання та опори для зворотної пружини. Котушка разом із магнітопроводом може виконуватися окремим компактним вузлом, який легко демонтується незалежно від основної частини ЛЕМД. Це забезпечує зручність експлуатації та обслуговування. Крім того, двигун зберігає працездатність навіть після зняття утримувача, що не властиво для варіанта з циліндричним якорем.

Оскільки пристрій утримування повинен забезпечувати:

- значну силу опору на початку ходу;
- мінімальний опір у решті ходу;
- можливість регулювання сили утримання;
- низьку потужність керування;
- відсутність шуму та механічного зношування;

то найбільш придатною конструкцією є електромагнітний утримувач із дисковим якорем, що притягується зовні магнітопроводу.

Такий утримувач має мінімальне співвідношення тягових сил на початку й у кінці ходу та забезпечує найбільш ефективний режим накопичення магнітної енергії.

Аналіз існуючих схем утримання якоря та можливостей їх інтеграції з ЛЕМД показує, що застосування утримуючих пристроїв є ефективним методом

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

підвищення енергетичних та динамічних характеристик пресового обладнання. Найбільш доцільним для застосування в приводах ударної дії є електромагнітні системи утримування з дисковим якорем, які поєднують структурну простоту, високу надійність, ефективність накопичення енергії та мінімальні експлуатаційні витрати. Саме така конструкція повинна бути покладена в основу приводу пресового обладнання нового покоління.

### 1.5 Висновки до першого розділу

У першому розділі встановлено, що технологічні процеси легкої промисловості базуються на операціях ударної та пресової дії, серед яких провідне місце посідають вирубування та перфорування деталей з натуральної та штучної шкіри, текстильних матеріалів, полімерів і композиційних структур. Показано, що ці операції висувають підвищені вимоги до точності дозування зусилля, швидкодії, стабільності силового профілю та повторюваності циклів, оскільки помилки на етапі формування контуру деталей практично не підлягають корекції й безпосередньо впливають на якість, посадку та довговічність готових виробів. Аналіз властивостей матеріалів (анізотропія, шаруватість, пружність, схильність до міжшарового ковзання тощо) показує необхідність формування короткочасного, керованого й добре локалізованого ударного імпульсу, адаптованого до конкретного виду заготовки.

Проведене порівняння електромеханічних, гідравлічних та пневматичних приводів обладнання ударної й пресової дії засвідчило, що, незважаючи на їх широке використання, такі системи мають низку принципівих недоліків: багатоступеневе перетворення енергії, підвищену інерційність, значні втрати в проміжних вузлах, потребу у постійному енергоживленні під час холостих ходів, а також ускладнене регулювання силового профілю. Показано, що в умовах сучасних вимог до енергоефективності та якості продукції ці недоліки істотно знижують техніко-економічні показники традиційних пресових систем. На цьому тлі лінійні

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

електромагнітні двигуни розглядаються як перспективна альтернатива, оскільки забезпечують пряме перетворення електричної енергії у поступальний рух, споживають енергію переважно в момент виконання операції та дають змогу формувати короткі високошвидкісні імпульси зусилля.

Огляд схем утримування якоря ЛЕМД показав, що застосування пристроїв електромагнітного утримання на початковому етапі циклу дає можливість працювати в режимі статичного індуктивного накопичення магнітної енергії, підвищуючи початковий струм зрушування, енергію та швидкість удару. Проаналізовано різні варіанти виконання утримувачів і обґрунтовано доцільність використання електромагнітного утримувача з дисковим якорем, який поєднує конструктивну простоту, компактність, можливість регулювання сили утримування, відсутність інтенсивного зношування й шуму. Таким чином, результати першого розділу підтверджують актуальність розробки пресового обладнання нового покоління на основі лінійного електромагнітного двигуна з електромагнітним утримувачем, що має підвищені енергетичні характеристики та здатне забезпечити високоякісне виконання операцій вирубування і перфорування в легкій промисловості.

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

## 2 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПРЕСУ З ПІДВИЩЕНИМИ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

### 2.1 Обґрунтування вибору конструктивної схеми пресового обладнання з ЛЕМД із електромагнітним утримувачем

Створення пресового обладнання ударної дії на основі лінійного електромагнітного двигуна передбачає вибір такої конструктивної схеми, яка забезпечить підвищені енергетичні показники та високу стабільність технологічного процесу. Аналіз традиційних приводів ударної дії, зокрема гідравлічних, пневматичних і механічних пресів, показав, що їх недоліками є значні енергетичні втрати, складність конструкції, наявність проміжних перетворень енергії та обмежена швидкість. Під час роботи таких машин електрична енергія постійно витрачається на підтримання тиску чи обертального руху, що суперечить сучасним вимогам енергоефективності та обмежує можливість точно регулювати параметри удару [13-17].

Лінійний електромагнітний двигун забезпечує безпосереднє перетворення електричної енергії у механічну енергію поступального руху, що дозволяє знизити втрати й забезпечити високу швидкість спрацювання. Однак для досягнення значної енергії удару необхідно реалізувати режим статичного індуктивного накопичення магнітної енергії. У цьому режимі якір утримується в нерухомому положенні до накопичення в обмотці такої кількості магнітної енергії, яка забезпечує потужне збурення та прискорений рух після відпускання. Саме тому конструкція пресового обладнання повинна включати пристрій електромагнітного утримання, який стабілізує момент початку руху та дозволяє збільшити струм зрушування.

Застосування автономного електромагнітного утримувача з дисковим якорем забезпечує можливість точного регулювання сили утримання шляхом зміни параметрів живлення. Такий утримувач зберігає незалежність магнітних потоків робочого двигуна та самого пристрою утримання, що спрощує схему керування і

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

підвищує надійність. Дисковий якір є компактним, не потребує складних механічних заціпок, не створює шуму та не піддається зношуванню, що особливо важливо для експериментального обладнання. На відміну від циліндричних втяжних конструкцій, варіант із дисковим якорем не збільшує висоту пружинної камери та допускає простий демонтаж.

Вибір механічної частини пресу також обумовлений характером навантажень, які виникають у процесі вирубування. Робочий орган повинен передавати зусилля строго вертикально, без перекосів, тому використовується система зі штоком, який з'єднує якір ЛЕМД із ударником. Додатковий шток, підпружинений гальмівною пружиною, поглинає частину енергії при зворотному русі, зменшуючи ударні навантаження на механізм. Пружина повернення забезпечує повернення якоря у вихідне положення після завершення циклу та створює необхідну протидію на початку зворотного ходу. Така компоновка дозволяє мінімізувати вібрації, забезпечити стабільність розміру та точності вирубних деталей і продовжити ресурс пресового обладнання.

Узагальнюючи проведений аналіз, обрана конструктивна схема поєднує ЛЕМД із автономним електромагнітним утримувачем, ударну систему, гасильну та повертаючу пружини та жорстку опорну конструкцію. Таке обладнання здатне забезпечити високу енергію та швидкість удару, зменшити втрати енергії, підвищити повторюваність технологічної операції та гарантувати безпечні умови роботи. Обрана схема повністю відповідає вимогам до експериментального пресового обладнання з підвищеними енергетичними характеристиками та дозволяє отримати достовірні результати під час дослідження динаміки технологічного процесу вирубування.

## 2.2 Розробка структурної схеми електромагнітного пресу з підвищеними енергетичними характеристиками

Структурна схема електромагнітного пресу з підвищеними енергетичними характеристиками відображає функціональну послідовність взаємодії його основних вузлів, через які проходять енергія та зусилля під час виконання технологічної операції вирубування. Формування структурної схеми є важливим етапом розроблення пресового обладнання, оскільки саме вона визначає логічні зв'язки між електромагнітною, механічною та технологічною частинами установки та дозволяє чітко окреслити роботу кожного елемента під час ударного циклу.

Основою роботи пресу є лінійний електромагнітний двигун (ЛЕМД), який формує імпульсну дію завдяки безпосередньому перетворенню електричної енергії в механічну енергію поступального руху (рис.2.1).

Для реалізації режиму статичного індуктивного накопичення в конструкції передбачено автономний електромагнітний утримувач, що забезпечує штучну затримку якоря до моменту досягнення необхідної величини магнітної енергії. Саме тому у структурній схемі першим елементом виступає пристрій утримання якоря, який визначає початкову фазу роботи преси та впливає на формування зусилля удару.

Після відключення утримуючого електромагніта прискорений рух якоря створюється основною обмоткою ЛЕМД, тому наступним елементом схеми є лінійний електромагнітний двигун, який генерує механічну енергію робочого ходу. Далі енергія передається на робочий орган - ударник, який слугує проміжною ланкою між електромагнітною частиною пресу та робочим інструментом.

Наступною ланкою є робочий інструмент (різак), форма ріжучої кромки якого відповідає контурові майбутньої деталі. Різак безпосередньо взаємодіє з матеріалом, який розміщується під ним, та забезпечує відокремлення заготовки в результаті удару. Тому у структурній схемі після різача розташовано блок "Матеріал", що відображає основний технологічний об'єкт обробки.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

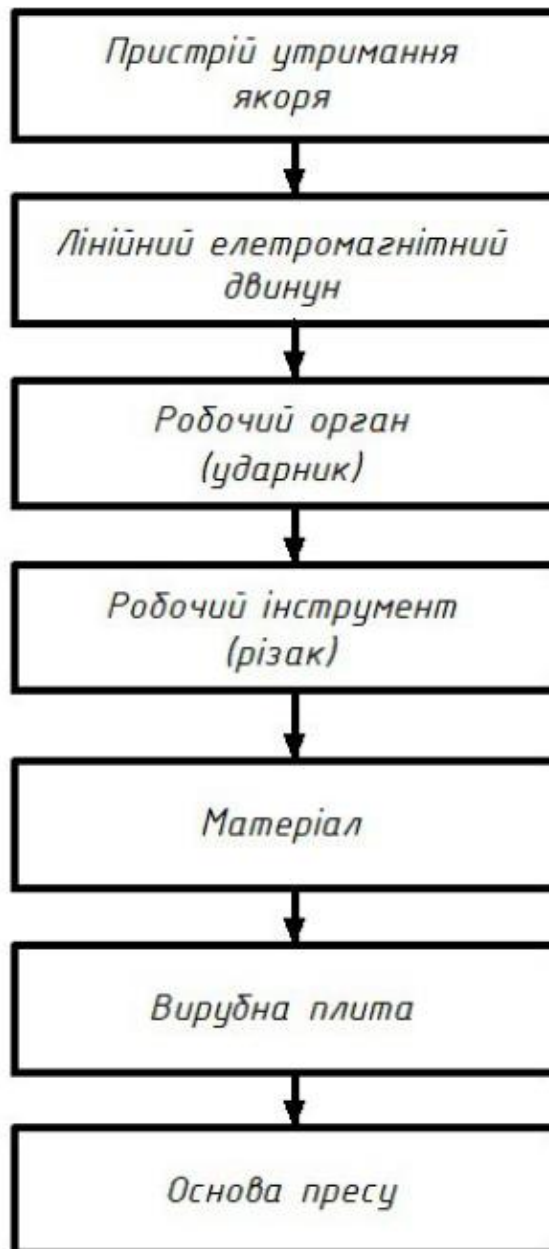


Рисунок 2.1 – Структурна схема електромагнітного пресу з електромагнітним утримувачем

Під матеріалом знаходиться вирубна плита, що служить опорною поверхнею, на яку припадає ударне навантаження під час різання. Вибір матеріалу плити визначає якість вирубання та довговічність різачка: полімерна плита забезпечує занурення різачка та повний зріз, тоді як металева використовується для матеріалів високої жорсткості, де занурення недопустиме.

Завершальним елементом схеми є основа пресу, на якій закріплюються всі вузли обладнання. Основа забезпечує загальну жорсткість конструкції, сприймає ударні навантаження та гарантує стабільність роботи пресу в цілому.

Структурна схема, наведена на рис. 2.2, відображає ієрархічний вертикальний зв'язок між усіма елементами та відповідає фактичній компоновці обладнання, що буде розглянута у пункті 2.4. Такий підхід дозволяє чітко простежити шлях передавання енергії - від магнітного поля утримувача та ЛЕМД до деформації (руйнування) матеріалу і забезпечення технологічного результату.

### 2.3 Вихідні дані електромагнітного пресу з підвищеними енергетичними характеристиками

Для розроблення електромагнітного пресу з підвищеними енергетичними характеристиками були визначені вихідні параметри основних складових системи: лінійного електромагнітного двигуна (ЛЕМД), пресового обладнання та електромагнітного утримувача. Зазначені дані служать базою для інженерних розрахунків, моделювання та подальшої розробки конструктивних елементів експериментальної установки. Вихідні характеристики сформовані на основі технічних рекомендацій, викладених у спеціалізованій літературі, а також з урахуванням особливостей технологічної операції вирубування.

Вихідні дані лінійного електромагнітного двигуна.

У якості приводу пресового обладнання було прийнято ЛЕМД втяжного типу, що працює від джерела постійного струму. Робочий хід здійснюється за рахунок дії однієї робочої обмотки, що забезпечує формування електромагнітного зусилля у напрямку зменшення робочого зазору. Холостий хід виконується за рахунок енергії зворотної пружини, що значно спрощує конструкцію та підвищує її надійність. Регулювання основних параметрів роботи двигуна - зусилля, швидкості та тривалості імпульсу - реалізується зміною параметрів джерела живлення.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Охолодження двигуна передбачається природне повітряне, що усуває необхідність застосування спеціалізованих систем відведення тепла.

Основні параметри лінійного електромагнітного двигуна:

- максимальна електромагнітна сила  $F_{ел} = 15\ 300\ \text{Н}$ ;
- хід якоря  $\delta_{як} = 30\ \text{мм}$ ;
- діаметр якоря  $d_{як} = 70\ \text{мм}$ ;
- висота двигуна  $L_{дв} = 175\ \text{мм}$ ;
- діаметр проводу обмотки  $d_{пр} = 2,5\ \text{мм}$ ;
- кількість витків обмотки  $w = 695$ ;
- опір обмотки  $R = 0,4\ \text{Ом}$ .

Магнітопровід двигуна (статор, якор, стоп, фланці) виготовлений зі сталі марки Сталь 10 [18], що забезпечує оптимальне співвідношення магнітних і механічних властивостей. Статор є нешихтованим та містить кілька радіальних пазів для зменшення втрат на вихрові струми. Направляючі стержні виконані з немагнітної корозійностійкої сталі 1Х18Н9Т [19], що мінімізує вплив паразитних магнітних потоків. Обмотка є каркасною, котушковий каркас виготовлений із теплостійкої пластмаси. Провід виконано з мідного емальованого дроту марки ПЕВ-2.5, що має високооміцну ізоляцію та високі допустимі струмові навантаження [20].

Вихідні дані пресового обладнання.

Пресове обладнання з ЛЕМД повинно забезпечувати виконання технологічної операції вирубкування за ударним принципом. Прес працює у режимі одиничних ударів, що дозволяє проводити експериментальні та налагоджувальні дослідження в умовах лабораторної установки. Основні вихідні параметри пресу включають:

- принцип роботи - прес / прес-молот ударної дії;
- режим роботи одиничний;
- величина робочого ходу до 30 мм;
- частота ударів до 30 уд/хв, чого достатньо для експериментальних оцінок;

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- конструктивне виконання настільне, що забезпечує компактність та мобільність;

- положення робочого органу вертикальне.

Дані параметри забезпечують можливість проведення широкого діапазону досліджень: визначення динамічної сили, впливу струму зрушування, енергетичних властивостей ЛЕМД, а також ефективності технологічного вирубання.

Вихідні дані електромагнітного утримувача.

Електромагнітний утримувач є ключовим функціональним елементом конструкції, що забезпечує модифікацію динамічних властивостей двигуна за рахунок накопичення магнітної енергії у статичному режимі. Для конструкції пресу було прийнято утримувач втяжного типу з дисковим якорем. Такий тип є найбільш раціональним з огляду на компактність, відсутність складних механічних елементів та можливість ефективного регулювання сили утримання.

Основні характеристики утримувача:

- тип електромагніта втяжний із дисковим якорем;
- рід струму постійний;
- здійснення робочого ходу: однією обмоткою;
- режим роботи одиничний;
- регулювання сили утримання зміною параметрів джерела живлення;
- охолодження природне повітряне.

Такий утримувач забезпечує короткочасне блокування якоря до моменту накопичення необхідної магнітної енергії в обмотці, що є критично важливим для формування високої швидкості й енергії удару.

Обґрунтування вибору способу повернення якоря.

Аналіз літературних джерел [11-14] показує, що спосіб повернення рухомих частин електромагнітних двигунів суттєво впливає на їхні статичні й динамічні характеристики. Серед різних методів - пружинний, за рахунок противаги, допоміжною обмоткою - найбільш раціональним для даної конструкції є застосування циліндричної пружини стискання.

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

Вибір пружини зумовлений такими факторами:

- зусилля холостого ходу складає менше 10 % від робочого зусилля, а отже не вимагає значної енергії повернення;
- пружина є компактною, дешевою, технологічною у виготовленні;
- конструкція забезпечує високу швидкість з мінімальною інерцією;
- практичний досвід підтверджує її надійність у багатоциклових режимах;
- відсутність складних кінематичних механізмів спрощує обслуговування та зменшує масу пресу.

Таким чином, використання пружини як елемента повернення є оптимальним рішенням для компактного лабораторного пресу з ЛЕМД.

Сформовані вихідні дані для електромагнітного пресу з підвищеними енергетичними характеристиками визначають технічну концепцію всієї системи та обґрунтовують вибір основних конструктивних параметрів. Особливості лінійного електромагнітного двигуна, утримуючого пристрою та настільної конструкції пресу забезпечують можливість формування високої енергії удару та стабільної роботи приводу в одиничних режимах. Зазначені вихідні показники слугують базою для подальших розрахунків електромагнітних, енергетичних та динамічних характеристик, а також для розробки конструктивних вузлів пресу у наступних підрозділах.

#### 2.4 Розробка конструкції електромагнітного пресу з підвищеними енергетичними характеристиками

Конструкція електромагнітного пресу з підвищеними енергетичними характеристиками розроблена з метою забезпечення високої ударної енергії, стабільності робочих циклів та зручності експлуатації у лабораторних і виробничих умовах [21-25]. Узагальнена конструктивна схема пресового обладнання представлена на рис. 2.2 та на кресленні [МРМА25.00.00.000СК], де наведено взаємне розташування основних складових агрегату.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

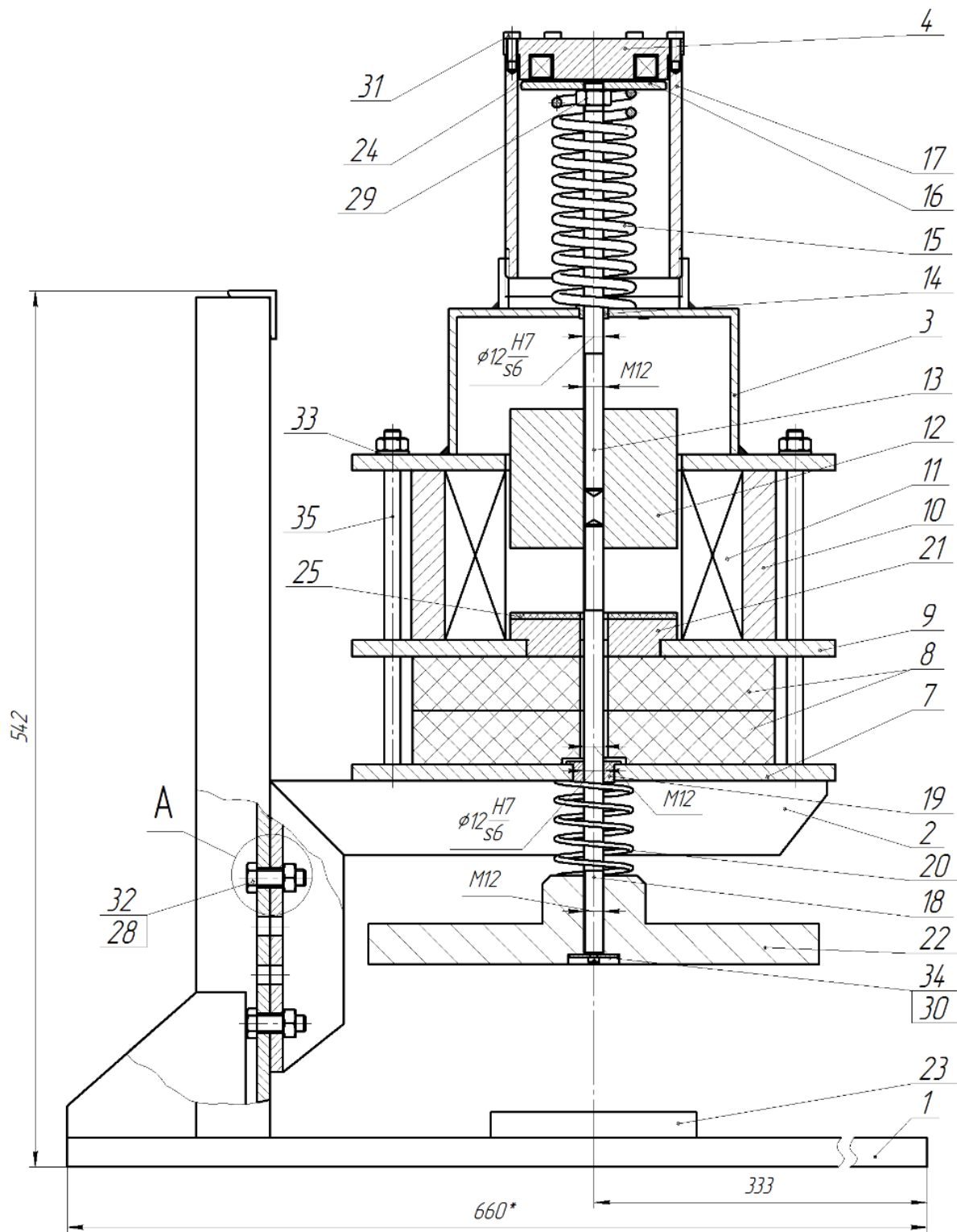


Рисунок 2.2 – Конструктивна схема пресового обладнання з ЛЕМД із електромагнітним утримувачем

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

MPMA25.00.00.000 ПЗ

Арк.  
39

Пресо́ва установка побудована за модульним принципом і складається з кількох функціональних вузлів, які забезпечують механічну жорсткість конструкції, високу точність направлення рухомих елементів та ефективне перетворення електромагнітної енергії в механічну. Особливу увагу під час розробки конструкції приділено досягненню синхронної роботи ЛЕМД та утримуючого пристрою, мінімізації паразитних втрат, забезпеченню доступності до обслуговування та можливості швидкої заміни окремих деталей.

Опорна конструкція та силова рама пресу.

Основою пресового обладнання є зварна опора 1, яка складається з масивної основи та жорстких кутових елементів-консолей. Така конструкція забезпечує високу жорсткість під час роботи, відсутність небажаних вібрацій та деформацій, що критично важливо для забезпечення точності операції вирубування. Основні несучі елементи виготовлені з прокатної сталі, що гарантує тривалу експлуатацію без втрати геометрії.

До опори болтовими з'єднаннями 28 та 32 кріпляться два швелери 2, попередньо зігнуті під прямим кутом. Застосування швелерів дозволяє сформувати жорстку просторову конструкцію та створює базову платформу для монтажу інших вузлів. Через них за допомогою чотирьох шпильок 35 закріплюється вертикальна модульна частина пресу.

Монтаж магнітної системи та корпусних елементів.

До швелерів кріпляться такі основні елементи:

- плита 7, що виконує функцію несучої площадки;
- проміжні диски 8, які вирівнюють магнітний потік та забезпечують точне позиціонування магнітопроводу;
- магнітопровід 10 із вмонтованою робочою котушкою 11;
- верхня кришка 3, з'єднана з верхньою плитою методом зварювання.

Магнітопровід виготовлений із суцільної конструкційної сталі та має внутрішню порожнину, в якій розміщується котушка та рухоме осердя. Конструкція

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк. 40
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

забезпечує рівномірний розподіл магнітного поля та мінімальні втрати на вихрові струми.

У центральному осьовому отворі магнітопроводу та кришки розташовано якір 12, який є основним рухомим елементом приводу. Якір переміщується вздовж поздовжньої осі пресу з високою точністю за рахунок системи направлення.

Механізм повернення та кінематика робочого руху.

Повернення якоря у початкове положення здійснюється за допомогою штока 13, що рухається у напрямній втулці 14. На штоку закріплена пружина 15, яка створює зусилля, необхідне для здійснення холостого ходу. Пружина працює на стискання та забезпечує швидке повернення якоря після завершення удару.

Пружина діє на диск 16, який закріплений гайкою 29 на штоку і одночасно виконує функцію рухомого осердя утримуючого електромагнітного модуля. Цей диск взаємодіє з утримуючим магнітопроводом 4, розміщеним на корпусному стакані 17, формуючи систему регульованого утримання якоря перед початком робочого ходу.

Механізм передачі руху до ударника.

Поступальний рух якоря передається на виконавчий механізм пресу через другий шток 18, який працює у направляючій втулці 19. Для запобігання ударним перевантаженням у зворотному напрямку шток оснащений додатковою пружиною 20, що демпфує небажані коливання та знижує навантаження на втулки та корпус.

На нижньому кінці штокової групи закріплений ударник 22, який безпосередньо взаємодіє з робочим інструментом - різак. Кінцевий удар формується передачею кінетичної енергії від рухомого осердя ЛЕМД до різального інструмента.

Ударник передає енергію на вирубний ніж, який прорубує матеріал, розташований на вирубній плиті 23. Плита забезпечує тверду опору, рівномірний розподіл тиску та запобігає пошкодженню основи пресу.

Аналіз конструктивних особливостей.

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

У процесі розробки конструкції було враховано такі вимоги:

- забезпечення високої жорсткості всієї системи;
- мінімізація холостих витрат енергії;
- оптимальне ведення магнітного потоку через робочу ділянку;
- ефективність передачі руху від якоря до ударника;
- забезпечення можливості швидкого демонтажу окремих вузлів під час сервісу;
- безпека оператора під час експлуатації пресу;
- зручність для відлагоджувальних та експериментальних робіт.

Важливою перевагою є можливість точного регулювання сили утримання за рахунок зміни параметрів живлення утримуючого електромагніта. Це дозволяє адаптувати прес до роботи з матеріалами різної жорсткості та товщини без зміни конструкції.

Окрема увага приділялася синхронізації роботи якоря ЛЕМД із утримуючим пристроєм, що забезпечує накопичення максимального запасу магнітної енергії перед ударом. Це дозволяє суттєво підвищити силу та швидкість удару, забезпечуючи високу якість технологічної операції.

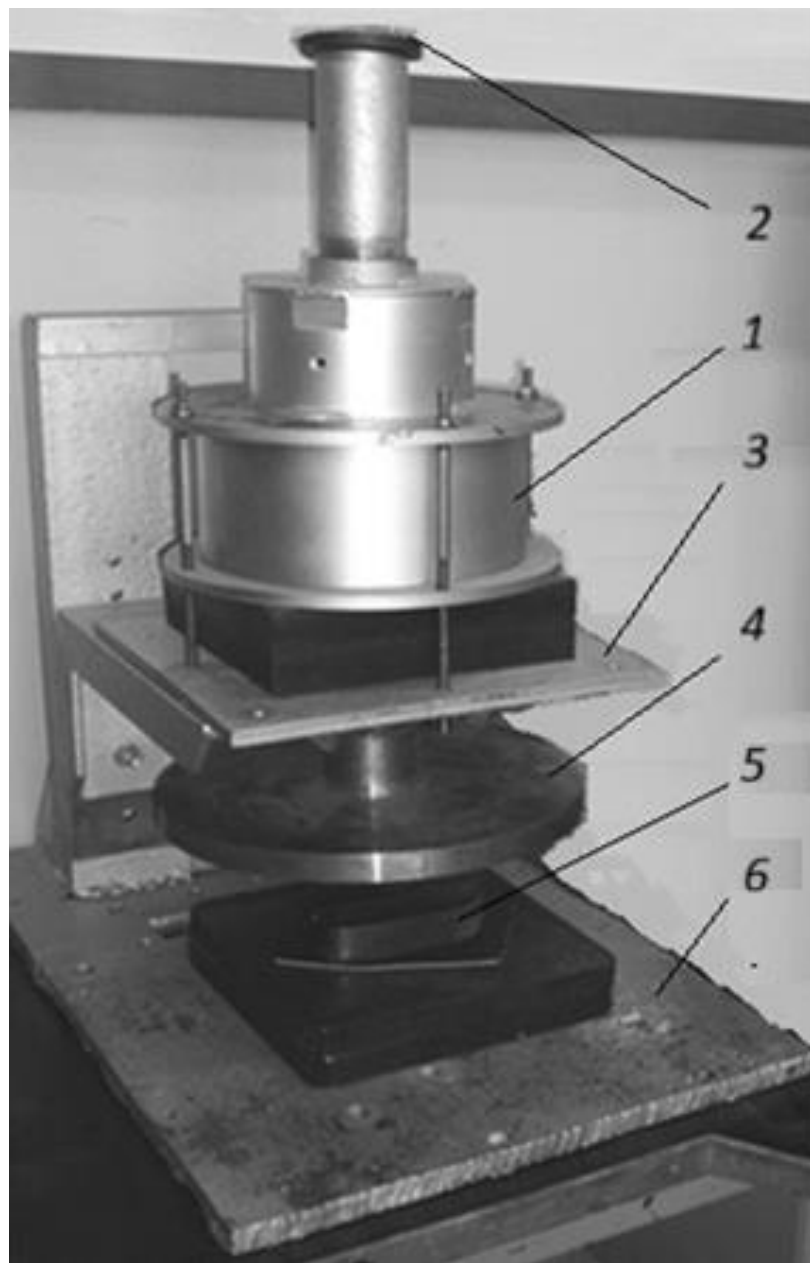
#### 2.4 Загальний вигляд електромагнітного пресу з електромагнітним утримувачем

Розроблене пресове обладнання з ЛЕМД із електромагнітним утримувачем дає змогу виконувати операцію вирубкування деталей взуття. Загальний вигляд пресового обладнання, призначеного для виконання операції вирубкування, представлено на рис. 2.4.

Розроблене пресове обладнання з лінійним електромагнітним двигуном та електромагнітним утримувачем призначене для виконання технологічних операцій вирубкування деталей в легкій промисловості, зокрема у взуттєвому виробництві. На рис. 2.4 наведено загальний вигляд експериментального зразка пресу, конструкція якого була створена відповідно до вимог забезпечення підвищених

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

енергетичних характеристик і стабільної роботи устаткування в імпульсному режимі.



1 – лінійний електромагнітний двигун; 2 – пристрій утримування якоря;

3 – консоль; 4 – ударник; 5 – робочий інструмент; 6 – плита

Рисунок 2.4 – Загальний вигляд пресового обладнання з ЛЕМД

Головним вузлом установки є лінійний електромагнітний двигун 1, який формує імпульс механічної енергії для переміщення ударних частин обладнання.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА25.00.00.000 ПЗ

Арк.

43

ЛЕМД складається з магнітопроводу, обмотки збудження та рухомого якоря, що отримує прискорений поступальний рух при подачі імпульсу струму. Особливістю конструкції є можливість роботи двигуна в режимі статичного індуктивного накопичення, що дозволяє збільшити енергію удару та забезпечити високу якість вирубування деталей.

У верхній частині двигуна розташований пристрій електромагнітного утримування якоря 2, який забезпечує штучну затримку початку руху якоря до моменту накопичення достатнього рівня магнітної енергії. Завдяки цьому значно підвищується струм зрушування, а отже, енергія та швидкість удару, що є критично важливим для технологічної операції вирубування матеріалів різної твердості.

Корпус двигуна та утримуючого пристрою закріплено на жорсткій металевій конструкції--консолі 3, яка виконує роль несучого елемента та забезпечує точне вирівнювання рухомих частин по вертикальній осі. Консоль сприймає основні динамічні навантаження під час виконання удару, тому її конструкція виконана зі сталевих елементів підвищеної жорсткості.

Робочий імпульс передається від якоря ЛЕМД на ударник 4, який безпосередньо взаємодіє з робочим інструментом. Ударник має форму масивного металевого елемента, здатного переносити багаторазові цикли ударних навантажень без деформацій та втрати точності. Конструкція ударника забезпечує рівномірний розподіл зусилля по всій площі різачка.

У нижній частині пресу встановлено робочий інструмент 5 - це вирубний різак, контур якого повторює форму деталі взуттєвої заготовки. Розміщення різачка здійснюється вручну оператором, після чого проводиться ударний цикл. Якість вирубування залежить від гостроти різачка та правильного підбору матеріалу вирубної плити.

Основою є металева плита 6, що слугує опорною поверхнею для вирубної плити та матеріалу.

Загальна компоновка пресу характеризується компактністю, достатньою

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

жорсткістю та можливістю доступу до основних вузлів для виконання регулювання та технічного обслуговування. Наявність електромагнітного утримувача та ЛЕМД у структурі обладнання дозволяє реалізувати режим інтенсивного імпульсного навантаження з мінімальними енергетичними втратами та високою повторюваністю технологічних циклів.

## 2.5 Принцип роботи електромагнітного пресу з підвищеними енергетичними характеристиками

Електромагнітний прес з підвищеними енергетичними характеристиками працює за принципом перетворення електромагнітної енергії, накопиченої в обмотці лінійного електромагнітного двигуна, у кінетичну енергію рухомих елементів, що забезпечує ударний вплив на різальний інструмент. Робочий цикл пресу складається з кількох етапів, кожен з яких визначається взаємодією електричних, магнітних і механічних процесів.

Підготовка до операції вирубування.

Перед початком роботи матеріал, з якого необхідно вирубати деталі, розміщують на вирубній плиті 23. Властивості цієї плити суттєво впливають на якість процесу. Якщо плита виготовлена з м'якого полімерного матеріалу, різак може занурюватися в її поверхню на глибину до 1–2 мм, що забезпечує повноцінне та чисте вирубування контуру деталі. Використання металевої плити, навпаки, не допускає занурення різача, що може призводити до його швидкого затуплення та неповного прорізання матеріалу. З огляду на це для експериментальних операцій доцільним є застосування саме полімерних плит.

Після укладання матеріалу на плиту зверху встановлюють вирубний різак, форма ріжучої кромки якого повністю відповідає контуру майбутньої деталі. Різак може позиціонуватися вручну або за допомогою направляючої оснастки залежно від типу операції та вимог до точності.

Подача живлення та формування електромагнітних сил.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Пуск пресу розпочинається з подачі напруги на робочу обмотку 11, розташовану всередині магнітопроводу. Через обмотку протікає струм, який створює магнітне поле та, відповідно, електромагнітну силу, що спрямована на переміщення якоря 12 униз. Це є початком процесу накопичення електромагнітної енергії в системі.

Синхронно із подачею живлення на робочу котушку подається напруга на утримуючий електромагніт 4. Електромагнітний утримувач через дисковий якір 16, закріплений на штоку 13, створює обмежувальну силу, яка утримує основний якір у верхній початковій позиції, запобігаючи передчасному руху. Одночасно із силою утримувача на якір діє і пружина 15, яка також протидіє його переміщенню вниз.

На цій стадії основною умовою є накопичення необхідної магнітної енергії в обмотці ЛЕМД, що дозволить сформувати потужний ударний імпульс.

Момент відривання та формування удару.

Після досягнення струмом у котушці певного порогового значення, яке відповідає необхідній силі для подолання утримуючого зусилля, система автоматики відключає живлення утримуючого електромагніта. Від цієї миті обмежувальна сила зникає, і якір 12 починає рухатися вниз під дією накопиченої електромагнітної енергії.

Під час руху стискається зворотна пружина 15, а гальмівна пружина 20, навпаки, розтискається, компенсуючи частину динамічних навантажень та забезпечуючи плавність ходу.

Через шток 18 рух якоря передається на ударник 22, який здійснює удар по різаку. Передане зусилля та швидкість ударника визначають якість різання та здатність прорізати матеріал певної товщини та жорсткості.

Ударник продовжує рухатися разом із різакком до моменту входження різакка в матеріал. Якщо застосовується полімерна плита, ударник разом з різакком може занурюватись до моменту торкання опорної поверхні.

Процес вирубування та кінець робочого ходу.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

У момент контакту з вирубною плитою або при досягненні максимальної глибини вирубівання система переходить у фазу уповільнення. Частина кінетичної енергії зворотного руху поглинається гальмівною пружиною 20, що зменшує шум, ударні навантаження та подовжує ресурс механічних вузлів.

Зворотний хід і підготовка до нового циклу.

Після завершення вирубівання починається зворотний рух рухомих частин пресу. Відновлення початкового положення забезпечується пружиною 15, яка розтискається і переміщує якір, шток та ударник у вихідне положення. Завдяки оптимальній жорсткості пружини зворотний рух є плавним та безпечним, без вторинних ударів у крайні точки.

Гальмівна пружина додатково компенсує інерційні навантаження та знижує ймовірність резонансних коливань у конструкції.

Після повного повернення всіх елементів у початкове положення система готова до повторення циклу вирубівання. Керування пресом здійснюється автоматизовано або вручну залежно від режиму роботи.

Принцип роботи електромагнітного пресу базується на ефективному перетворенні накопиченої магнітної енергії в механічну енергію удару, який здійснюється з високою швидкістю та значним зусиллям. Синхронна робота робочої обмотки ЛЕМД, утримуючого електромагніта, двох систем пружин і механізму передачі руху забезпечує можливість формування потужного та керованого ударного імпульсу, необхідного для високоякісного вирубівання деталей. Конструкція пресу дає змогу забезпечити надійність циклу, повторюваність результатів та адаптивність до різних типів матеріалів.

## 2.6 Висновки до другого розділу

У другому розділі було обґрунтовано доцільність застосування лінійного електромагнітного двигуна з електромагнітним утримувачем як приводу пресового обладнання ударної дії для виконання операцій вирубівання. Показано, що

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

порівняно з традиційними гідравлічними, пневматичними й механічними приводами така схема забезпечує безпосереднє перетворення електричної енергії в поступальний рух, зменшення проміжних стадій перетворення, скорочення енергетичних втрат і можливість реалізації режиму статичного індуктивного накопичення магнітної енергії, що підвищує енергію та швидкість удару.

На основі аналізу було сформована структурна схема електромагнітного пресу, у якій послідовно відображено роботу пристрою утримання якоря, ЛЕМД, ударника, різача, матеріалу, вирубної плити та основи пресу. Визначені вихідні дані для ЛЕМД, пресового вузла та електромагнітного утримувача, а також обґрунтовано вибір пружинного способу повернення якоря, що забезпечує необхідну швидкодію, компактність конструкції та простоту реалізації.

Розроблено конструкцію електромагнітного пресу настільного типу з жорсткою зварною рамою, модульним розміщенням магнітної системи та ударного механізму, а також виконано опис загального вигляду установки та послідовності її роботи. Показано, що поєднання ЛЕМД із автономним електромагнітним утримувачем, пружиною і раціональною кінематикою рухомих ланок дає змогу сформувати потужний та керований ударний імпульс при мінімальних енергетичних втратах і високій повторюваності циклів. Отримані в розділі результати створюють необхідну теоретичну й конструкторську основу для подальших розрахунків електромагнітних, динамічних та енергетичних характеристик і проведення експериментальних досліджень роботи електромагнітного пресу.

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

## 3 РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ПРЕСУ З ЛЕМД З ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ УТРИМУВАЧЕМ

### 3.1 Розрахунок геометричних параметрів електромагнітного утримувача

Для розроблення конструкції пресового обладнання з ЛЕМД та електромагнітним утримувачем буде виконано розрахунок геометричних параметрів утримуючого електромагніта.

Проектний розрахунок електромагнітного утримувача здійснюватиметься за методикою, наведеною в [11], згідно з якою геометричні розміри циліндричного електромагніта із зовнішнім дисковим якорем, що притягується, визначають на підставі заданих значень тягового зусилля, робочого повітряного зазору, робочого струму обмотки та коефіцієнта розсіяння.

Як вихідні дані для розрахунку приймаються:

- необхідне тягове зусилля утримувача –  $F_{ym} = 800H$  ;
- робочий повітряний зазор –  $\delta = 1 \cdot 10^{-4} м$  ;
- робочий струм в обмотці електромагніта –  $I_k = 1A$  ;
- коефіцієнт розсіяння магнітного потоку –  $\sigma = 1,04$  (приймається в межах 1,0...2,5).

Розрахунок:

Прийнято, що поле в робочих зазорах рівномірне, а перетин осердя рівний перетину корпусу. Тоді вираз сили тяги електромагніту за формулою Максвела матиме вигляд:

$$F_{ym} = \frac{B_{\delta}^2 \cdot S_c}{\mu_0}, \quad (3.1)$$

де  $S_c = \frac{\pi \cdot d_c^2}{4}$  - площа перетину осердя;

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк. 49
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн / м}$  - магнітна проникливість повітряного зазору.

Було визначено за графіком кривих [11] магнітної індукції для зазначеного випадку індукцію в робочому зазорі рівною  $B_\delta = (1,2\dots1,4)\text{Тл}$ .

Тоді потрібний діаметр осердя електромагніту буде рівним

$$d_c = 2\sqrt{\frac{F_{ym} \cdot \mu_0}{\pi \cdot B_\delta^2}}; \quad (3.2)$$

$$d_c = 2\sqrt{\frac{800 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}}{3,14 \cdot 1,0^2}} = 3,6 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Щоб знайти решту розмірів магнітопроводу, потрібно знати розміри обмотувального вікна, які при заданому режимі роботи, знаходяться необхідною магніторушійною силою (м.р.с.) обмотки, що дорівнює сумі м.р.с. робочих зазорів ( $F_{\Sigma\delta}$ ) і м.р.с у сталі і паразитних зазорах ( $F_{CT}$ ):

$$F_{M.K} = F_{\Sigma\delta} + \sum F_{CT}. \quad (3.3)$$

Падіння магнітного потенціалу в робочих зазорах, при ( $S_{КОР} = S_C$ ) визначається наступним чином:

$$F_{\Sigma\delta} = \frac{\Phi_\delta}{G_{\Sigma\delta}} = \frac{2 \cdot B_\delta \cdot S_C \cdot \delta}{\mu_0 S_C} = \frac{2 \cdot B_\delta \cdot \delta}{\mu_0}; \quad (3.4)$$

$$F_{\Sigma\delta} = \frac{2 \cdot 1,0 \cdot 1 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}} = 160 \text{ А.}$$

Увівши коефіцієнт  $k_{II} = 0,15\dots0,35$ , що приблизно враховує падіння м.р.с у

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк. 50
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

сталі і паразитних зазорах, було отримано:

$$F_{M.K} = F_{\Sigma\delta} + k_{II} \cdot F_{M.K} . \quad (3.5)$$

Візьмемо для зазначеного випадку значення  $k_{II}$  ( $k_{II} = 0,15$ ).

Відповідно:

$$F_{M.K} = \frac{F_{\Sigma\delta}}{1 - k_{II}} ; \quad (3.6)$$

$$F_{M.K} = \frac{160}{0,85} = 200 A .$$

Було визначено число витків котушки електромагніту. Поскільки робочий струм в обмотці рівняється  $I=1A$ .

Тоді:

$$w = \frac{F_{M.K}}{I_K} ; \quad (3.7)$$

$$w = \frac{200}{1} = 200 \text{ витків} .$$

При тривалому режимі роботи обмоток щільність струму в котушці електромагніту слід вибирати в межах:

$$j_K = I_K / q = (2...4) \cdot 10^6 A / m^2 , \quad (3.8)$$

де  $q$  – площа поперечного перетину дроту котушки електромагніту без

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

ізоляції,  $m^2$ .

Прийнявши  $j_k = 2,5 \cdot 10^6 A / m^2$ , було визначено діаметр дроту котушки електромагніту без ізоляції:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot I_K}{\pi \cdot j_K}}; \quad (3.9)$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 1}{3,14 \cdot 2,5 \cdot 10^6}} = 0,71 \cdot 10^{-3} m.$$

За таблицею [11] було вибрано дріт марки ПЕВ-1, що має наступні найближчі більші дані:  $d = 0,74 \cdot 10^{-3} m$ ,  $d_1 = 0,8 \cdot 10^{-3} m$ ,  $f_0 = 0,673$ ;

де  $d, d_1$  – відповідно діаметри обмотувального дроту без ізоляції та з ізоляцією, м;

$f_0$  - коефіцієнт заповнення обмотки.

Площа обмотувального вікна котушки знаходиться за формулою:

$$Q_{O.K} = \frac{\pi \cdot d_1^2 \cdot w_k}{4 \cdot f_0}; \quad (3.10)$$

$$Q_{O.K} = \frac{3,14 \cdot (0,8)^2 \cdot 200}{4 \cdot 0,673} = 1,5 \cdot 10^{-4} m^2.$$

Співвідношення висоти обмотувального простору котушки електромагніту  $l_k$  і його ширина  $h_k$  як правило знаходяться по конструктивному чиннику ( $l_k / h_k$ ) – з кривих [11].

Для зазначеного типу електромагнітів  $l_k / h_k = 4,5$ .

Відповідно:

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						52
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$h_k = 0,6 \cdot 10^{-2} \text{ м}, \text{ і } l_K = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

Далі визначається решта розмірів магнітопроводу:

$$D_1 = d_C + 2h_K; \quad (3.11)$$

$$D_1 = (3,6 + 1,2) \cdot 10^{-2} = 4,8 \cdot 10^{-2} \text{ м},$$

$$S_{\text{Кор}} = S_C.$$

Прийнявши магнітне поле розсіяння плоскопаралельним, було отримано  $B_{\text{Кор}} = B_C$ :

$$D_2 = \sqrt{d_C + D_1^2}; \quad (3.12)$$

$$D_2 = 10^{-2} \cdot \sqrt{3,6^2 + 4,8^2} = 6 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$$

Виходячи з того, що середній перетин якоря є рівним перетину осердя, тобто

$$S_{\text{Я.СР}} = S_C = a_{\text{Я}} \cdot D_{\text{СР}} = a_{\text{Я}} \cdot (d_C + h_K), \text{ м}^2 \quad (3.13)$$

де  $D_{\text{СР}} = (d_C + D_1) / 2$ .

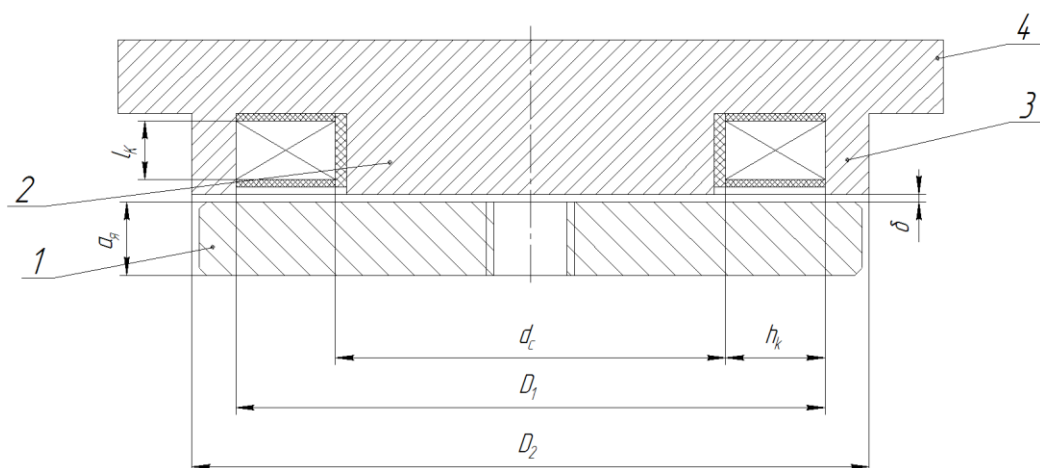
Визначення товщини тіла якоря:

$$a_{\text{Я}} = \frac{\pi \cdot d_C^2}{4 \cdot \pi \cdot (d_C + h_K)}; \quad (3.14)$$

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

$$a_{я} = \frac{(3,6 \cdot 10^{-2})^2}{4 \cdot (3,6 + 0,6) \cdot 10^{-2}} = 0,77 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

У зазначеному електромагніті робочий зазор малий, потоки розсіяння є незначними, тому товщину фланця  $a_{\phi}$  було взято рівною або трохи більше товщини якоря. Приймаємо  $a_{\phi} = 0,8 \cdot 10^2 \text{ м}$  (коефіцієнт розсіяння прийнятий рівним  $\sigma = 1,04$ ). Розрахований електромагнітний утримувач наведений на рис. 3.1.



1 – якір; 2 – осердя; 3 – корпус; 4 – фланець

Рисунок 3.1 – Циліндричний підйомний електромагнітний утримувач з дисковим якорем:

### 3.2 Розрахунок навантаження на робочі деталі

Розрахунок навантаження на робочі деталі пресу з ЛЕМД було виконано на основі вже прийнятих вихідних даних: максимальна електромагнітна сила лінійного двигуна  $F_{ел} = 15\,300 \text{ Н}$ , хід якоря  $\delta_{як} = 30 \text{ мм}$ , зусилля холостого ходу (від пружини) становить не більше 10 % робочого зусилля. Далі приймемо необхідні геометричні параметри окремих деталей і перевіримо їх міцність та запас довговічності.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		54

Передусім вважаємо, що максимальне зусилля, яке передається по кінематичному ланцюгу «якір – шток – ударник – різак – матеріал – плита», дорівнює тяговому зусиллю ЛЕМД з урахуванням механічних втрат [26]. Прийmemo ККД механічної частини  $\eta_{\text{мех}} \approx 0,85$ . Тоді розрахункова сила на різаку становитиме приблизно:

$$F_{\text{різ}} = \eta_{\text{мех}} \cdot F_{\text{ел}}, \quad (3.15)$$

Підставивши значення отримаємо:

$$F_{\text{різ}} = 0,85 \cdot 15300 \approx 13000 \text{ Н.}$$

Це зусилля відповідає максимальному навантаженню під час робочого удару. Мінімальне робоче зусилля в ланцюгу при холостому ході, яке створює лише пружина повернення, можна оцінити як:

$$F_{\text{хх}} = 0,1 F_{\text{різ}}, \quad (3.16)$$

$$F_{\text{хх}} = 0,1 \cdot 13000 = 1,3 \cdot 10^3 \text{ Н,}$$

що узгоджується з прийнятою раніше вимогою, що зусилля холостого ходу не перевищує 10 % робочого.

Для перевірки ударника припустимо, що він працює на центральний стиск (або розтяг при віддачі) і має круглий поперечний переріз діаметром  $d_{\text{уд}}$ . Візьmemo матеріал ударника - сталь 45 з допустимим напруженням при статичному навантаженні  $\sigma_{\text{доп}} = 140 \text{ МПа}$ . Введемо коефіцієнт запасу міцності  $n = 3$ , притаманний ударно-циклічній роботі. Тоді розрахункове допустиме напруження становитиме:

$$\sigma_{\text{доп,розр}} = \sigma_{\text{доп}} / n, \quad (3.17)$$

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$\sigma_{\text{доп,розр}}=140/3=47 \text{ МПа.}$$

Необхідну площу поперечного перерізу визначимо з умови:

$$A_{\text{потр}} \geq F_{\text{різ}}/\sigma_{\text{доп,розр}}, \quad (3.18)$$

$$A_{\text{потр}}=13000/47 \cdot 10^6=2,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Для круглого перерізу:

$$A=\pi d_{\text{уд}}^2/4 \geq A_{\text{потр}}. \quad (3.19)$$

Звідси мінімальний діаметр ударника:

$$d_{\text{мін}}=10-20 \text{ мм.}$$

Прийmemo конструктивно  $d_{\text{уд}}=12 \text{ мм}$ . Тоді фактична площа перерізу:

$$A_{\text{ф}}=\pi d_{\text{уд}}^2/4, \quad (3.20)$$

$$A_{\text{ф}}=4\pi \cdot 0,012^2=4,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2,$$

а дійсне напруження стиску:

$$\sigma_{\text{ф}}=F_{\text{різ}}/A_{\text{ф}}, \quad (3.21)$$

$$\sigma_{\text{ф}}=13000/4,9 \cdot 10^{-4}=26 \text{ МПа.}$$

Отримане значення більш ніж удвічі менше за розрахунково допустиме  $\sigma_{\text{доп,розр}} \approx 47 \text{ МПа}$ , отже, по перерізу ударник матиме достатній запас міцності навіть у разі підвищених локальних навантажень.

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

Далі перевіримо кріпильні елементи, які сприймають основне зусилля преса (наприклад, шпильки або болти, що стягують силовий блок з опорною рамою) [26]. В нашому випадку силова рама закріплена чотирма шпильками розміру, еквівалентного різьбі М12 із розрахунковим діаметром стержня  $d_{ст}=10,2$  мм. Робоча площа перерізу однієї шпильки:

$$A_{ш}=\pi d_{ст}^2/4, \quad (3.22)$$

$$A_{ш}=\pi \cdot 0,0102^2/4=8,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2.$$

Вважаємо, що вертикальне навантаження рівномірно розподіляється між чотирма шпильками, тоді сила на одну:

$$F_{ш}=F_{різ}/4, \quad (3.23)$$

$$F_{ш}=13000/4=3,25 \cdot 10^3 \text{ Н.}$$

Тоді дотичне напруження зрізу:

$$\tau_{\phi}=F_{ш}/A_{ш}, \quad (3.24)$$

$$\tau_{\phi}=3,25 \cdot 10^3/8,2 \cdot 10^{-5}=40 \text{ МПа.}$$

Для вуглецевої сталі конструкційного призначення допустиме напруження зрізу  $\tau_{доп}$  (з урахуванням коефіцієнта запасу 2–2,5) перебуває на рівні 70–80 МПа, отже, запас міцності кріпильних елементів становить не менше ніж 1,7–2. Це дозволяє вважати вибрану схему кріплення достатньо надійною при розрахунковому навантаженні.

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

Напружений стан інших елементів кінематичного ланцюга (штоки, дисковий якор, перехідні фланці) можна оцінювати аналогічно, виходячи з максимального осьового навантаження та геометрії перерізів. Оскільки всі ці деталі виконані з конструкційних сталей, а їхні поперечні розміри не менші за розміри ударника, можна стверджувати, що за нормальних технологічних допусків вони працюватимуть з порівнянним або більшим запасом міцності.

Оцінку довговічності конструкції при циклічних навантаженнях доцільно виконувати в припущенні, що максимальні робочі напруження не перевищують 0,3–0,4 від границі витривалості матеріалу при симетричному циклі згідно з відомими діаграмами втоми. Для сталі 45 границя витривалості при згині і розтягу-стиску знаходиться на рівні 200–250 МПа, а фактичні напруження, отримані в розрахунку для ударника й шпильок, не перевищують 25–40 МПа. Це свідчить про достатній резерв міцності для роботи в режимах багатоциклового навантаження ( $10^6$  циклів і більше) без появи втомних тріщин за умови коректного виготовлення й відсутності різких концентраторів напружень.

Таким чином, виконаний розрахунок навантажень у кінематичному ланцюгу, напружень у поперечних перерізах ударника та силових кріпильних елементів, а також орієнтовна оцінка втомної довговічності показують, що при прийнятих геометричних параметрах і матеріалах конструкція пресу з ЛЕМД із електромагнітним утримувачем має достатній запас міцності та може забезпечити надійну й безпечну роботу в умовах циклічних ударних навантажень.

### 3.3 Висновки до третього розділу

У третьому розділі на підставі прийнятих вихідних даних було виконано розрахунки, які підтверджують працездатність і раціональність обраних конструктивних рішень пресу з лінійним електромагнітним двигуном та електромагнітним утримувачем. Проектний розрахунок геометричних параметрів утримуючого електромагніта за відомою методикою дав змогу визначити розміри осердя, якоря,

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

магнітопроводу та обмотувального вікна з урахуванням заданого тягового зусилля, повітряного зазору, робочого струму та коефіцієнта розсіяння. Вибір діаметра дроту, кількості витків, габаритів котушки та елементів магнітопроводу забезпечує формування необхідної магніторушійної сили й тягового зусилля при допустимих теплових та електромагнітних навантаженнях. Це підтверджує, що електромагнітний утримувач здатний створювати розраховане зусилля фіксації якоря на етапі накопичення магнітної енергії без перевантаження обмотки та магнітної системи.

Розрахунок навантажень у кінематичному ланцюгу пресу показав, що максимальне зусилля, яке передається від ЛЕМД до різача, із урахуванням механічних втрат, забезпечує необхідний рівень технологічного впливу при вирубуванні, тоді як зусилля холостого ходу не перевищує 10 % робочого, що відповідає вимогам до пружинного повернення. Перевірка напруженого стану ударника, виконаного зі сталі 45, засвідчила, що фактичні напруження суттєво нижчі за розрахунково допустимі з урахуванням коефіцієнта запасу для ударно-циклічної роботи. Аналогічний висновок отримано для шпильок кріплення силового блоку: розраховані напруження зрізу не перевищують допустимих значень, а запас міцності є достатнім для надійної експлуатації. Орієнтовна оцінка втомної довговічності за рівнем робочих напружень і відомими значеннями границі витривалості конструкційних сталей показала можливість тривалої роботи конструкції в умовах багаточиклових ударних навантажень без виникнення втомних руйнувань за умови дотримання технології виготовлення та відсутності концентраторів напружень. Узагальнюючи результати розрахунків, можна стверджувати, що розроблений прес з ЛЕМД та електромагнітним утримувачем має достатній запас міцності, забезпечує необхідний рівень силового впливу й може надійно працювати в заданих експлуатаційних режимах, що обґрунтовує доцільність його подальшої дослідної та практичної реалізації.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

У магістерській роботі було виконано комплексне дослідження технологічних, конструктивних та розрахункових аспектів створення пресового обладнання для легкої промисловості на основі лінійного електромагнітного двигуна (ЛЕМД) з електромагнітним утримувачем якоря. Проведений аналіз, розробка конструкції та інженерні розрахунки підтверджують актуальність і ефективність впровадження електромагнітних приводів у технологічні процеси вирубування та перфорування матеріалів.

На підставі огляду технологічних операцій легкої промисловості встановлено, що вирубування й перфорування потребують високої точності дозування зусилля, мінімальної тривалості контакту, стабільності силового впливу та адаптивності до різних фізико-механічних властивостей матеріалів. Традиційні електро-механічні, гідравлічні та пневматичні приводи не повною мірою розв'язують ці задачі через значну інерційність, втрати енергії в холостих режимах та обмежені можливості формування швидкісних імпульсів. Порівняльний аналіз приводів показав, що ЛЕМД забезпечує пряме перетворення енергії в лінійний рух без проміжних механічних передавальних ланок, що підвищує енергоефективність, точність та швидкодію пресового обладнання.

У роботі обґрунтовано вибір електромагнітного утримувача з дисковим якорем як найбільш раціонального рішення для режиму статичного індуктивного накопичення енергії. Показано, що такий утримувач дозволяє підвищити початковий струм збудження ЛЕМД, збільшити запас магнітної енергії та забезпечити різке прискорення якоря в момент робочого ходу, що є критичним для якісного вирубування шаруватих, полімерних, текстильних і композитних матеріалів.

Розроблено конструкцію пресового обладнання з ЛЕМД та електромагнітним утримувачем, визначено принцип його роботи, сформовано структурну схему та здійснено проектування основних вузлів. Показано, що застосування електро-

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

магнітного приводу дозволяє реалізувати компактну, технологічно просту та енергоефективну конструкцію без необхідності застосування складних кінематичних механізмів, гідравлічних насосів або пневмосистем.

Інженерні розрахунки підтвердили працездатність запропонованого технічного рішення. Визначено геометричні параметри електромагнітного утримувача, розміри магнітопроводу, обмотки та якоря. Проведений аналіз напружено-деформованого стану ударника, штоків та кріпильних елементів засвідчив достатній запас міцності при дії максимальних технологічних навантажень. Розрахунок довговічності показав можливість роботи обладнання у багатоциклових ударних режимах без ризику передчасного втомного руйнування за умови правильного виготовлення й монтажу вузлів.

Узагальнюючи результати дослідження, можна зробити висновок, що запропонована конструкція пресу з ЛЕМД та електромагнітним утримувачем є технічно обґрунтованою, енергоефективною й перспективною для впровадження у виробництво легкої промисловості. Вона забезпечує можливість підвищення продуктивності, зменшення енергоспоживання, покращення точності технологічних операцій та підвищення якості готової продукції. Отримані результати створюють підґрунтя для подальших експериментальних досліджень, оптимізації конструкції та розроблення промислових зразків обладнання нового покоління.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						61
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Данилкович А. Г. Основні матеріали і технології виробництва шкіри: навч. посібник. - Київ, 2016. – 175 с.

2. Бабич А.І. Технологія виготовлення виробів з різних матеріалів: навч. посіб. - Київ : КНУТД, 2021. 248 с. 3. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Збірник наукових праць – Київ: КНУТД, 2009. – 183с.

4. Ресурсозберігаючі технології легкої, текстильної і харчової промисловості: збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції молодих вчених та студентів, 15-16 листопада 2018 р. – Хмельницький : ХНУ, 2018. – 311 с.

5. Поліщук О.С. Підвищення ефективності пресового обладнання для виконання операцій легкої промисловості: дис. ... канд. техн. наук. – КНУТД, 2001. – 165 с.

6. О.С. Поліщук, А.К. Кармаліта, О.П. Бурмістенков. Полімерні матеріали для виробництва виробів легкої промисловості та їх фізико-механічні властивості. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. №2. 2018. С.134-140.

7. Стрічкова розкрійна машина С-В2/900В-2 фірми TypeSpecial з електро-механічним приводом [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://welltex.ua/c-b2-900b-2-mashyna-raskroinaia-typespecial-lentochnaia-komplekt/>

8. Прес вирубувальний гідравлічний GL-12Т [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://soliy.com.ua/pres-vyrubuvalny-hidravlichnyi-gl-12t/?gad\\_source=1&gad\\_campaignid=18181180496&gbraid=0AAAAACniqSD0k2\\_NzLqgLx8QFW\\_cj7Vou&gclid=Cj0KCQiAiqDJBhCXARIsABk2kSmzBo9ocB\\_q6TmCvmovAp4HaRYbiYe25hz8rSiVACSHRe-XUK\\_rYKAaAprbEALw\\_wcB](https://soliy.com.ua/pres-vyrubuvalny-hidravlichnyi-gl-12t/?gad_source=1&gad_campaignid=18181180496&gbraid=0AAAAACniqSD0k2_NzLqgLx8QFW_cj7Vou&gclid=Cj0KCQiAiqDJBhCXARIsABk2kSmzBo9ocB_q6TmCvmovAp4HaRYbiYe25hz8rSiVACSHRe-XUK_rYKAaAprbEALw_wcB)

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						62
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

9. Type Special P-Q3 пневматичний прес для установки фурнітури 3-х головочний [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://sofitex.com.ua/ua/type-special-p-q3-pnevmatychnyj-pres-dlya-ustanovky-furnitury-3-h-golovochnyj.html>

10. SL-12(HF-ST3) Прес для установки фурнітури трьохпозиційний електромагнітний [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://amtex.com.ua/dzn-3/?srsltid=AfmBOoqa56GrBUvGcdolc-BtgJDLcuVDtWGHler7HJJ2NFEZI7QGdk1O>

11. Попович М.Г., Костицький В.В. Електромеханічні системи автоматизації та електропривод (теорія і практика). Навчальний посібник. – К.: КНУТД, 2008. – 408 с.

12. Поліщук О.С., Кармаліта А.К. Дослідження оптимального режиму роботи електромагнітного пресу, призначеного для виконання операції вирубування деталей взуття та визначення його енергетичних параметрів // Вісник технологічного університету Поділля”-Хмельницький: ТУП 2000 №5, Ч.1. С.17-20.

13. Bulat A., Mezentsev A. Linear electric motors in industrial applications. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 2019. – pp. 91–98.

14. Електромеханічні системи та приводи: навч. посіб. / За ред. Ю. В. Ковальова. – К.: КПІ ім. І. Сікорського, 2017. – 420 с.

15. Гайдук А. М., Сторожук І. М. Технологічні процеси обробки матеріалів тиском. – К.: НАУ-друк, 2019. – 268 с.

16. Fitzgerald A., Kingsley Ch., Umans S. Electric Machinery. – McGraw-Hill, 2013. – 708 p.

17. Слюсар А. Л., Колесник М. М. Гідравлічні та пневматичні приводи. – К.: КНЕУ, 2016. – 295 с.

18. Сталь 10 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://metinvest-smc.com/ru/steel/stal-10/?srsltid=AfmBOorfclzU3soWFF4zGiAAyfd0M6zf5nR\\_UgF0XZpaPAo3H2Y4yI](https://metinvest-smc.com/ru/steel/stal-10/?srsltid=AfmBOorfclzU3soWFF4zGiAAyfd0M6zf5nR_UgF0XZpaPAo3H2Y4yI)

–

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						63
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

19. Марки нержавіючої сталі та їх характеристики [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://armaх.ua/ua/marki-nerzhaveyushej-stali-i-ih-harakteristiki/>

20. Кабель та провід 2.5 мм [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://lampochka.net.ua/kabel-i-provid/kabelta-provid-2-5mm/>

21. Малащенко В.О. Деталі машин : збірник завдань та прикладів розрахунку / В.О. Малащенко, В.Т. Павлице ; Міністерство освіти і науки України, Національний університет "Львівська політехніка". - Львів : "Новий Світ-2000", 2019. - 214 с. 22. Автоматизація технологічних процесів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://kск.ua/>

22. Рудь Ю.С. Основи конструювання машин: Підручник для студентів інженерно-технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. 2-е вид., переробл. - Кривий Ріг: Видавець ФО-П Чернявський Д.О., 2015. – 492 с.

23. Деталі машин і основи конструювання : конспект лекцій / укладач В. В. Стрелец. – Суми : Сумський державний університет, 2022. – 150 с.

24. Коновалюк, Дмитро Михайлович, автор. Деталі машин. Практикум : навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів / Д.М. Коновалюк, Р.М. Ковальчук, В.О. Байбула, М.М. Товстушко. - Київ : Кондор, 2021. - 276 с. 20. Гайдамака А. В. Деталі машин. Основи теорії та розрахунків : навчальний посібник для студентів машинобудівних спеціальностей усіх форм навчання / А. В. Гайдамака. – Харків : НТУ «ХП», 2020. – 275 с.

25. Павлице В.Т. Основи конструювання та розрахунку деталей машин: Підруч.– 2-ге вид.перероб. – Львів: Афіша. 2003. – 560 с.

26. Основи розрахунків на міцність: конспект лекцій / В.І. Мороз, О.А. Логвіненко, В.І. Іщенко, О.В. Фомін. – Харків: УкрДАЗТ, 2012. -312с.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						64
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						65
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		