

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Дослідження пристрою з електромагнітним приводом та двохкоординатною системою переміщення для ударної перфорації та маркування деталей

Назва теми

Галузь знань 13 «Механічна інженерія»

Шифр, назва

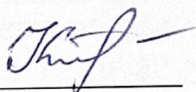
Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»

Шифр, назва

Освітня програма «Галузеве машинобудування»

Шифр МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 2 курсу
група МБм-24-1

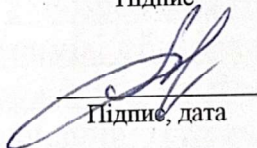


Підпис

Кравчук Д.Ю.

Ініціали, прізвище

Керівник

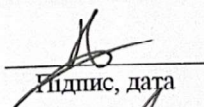


Підпис, дата

проф. Поліщук О.С.

Ініціали, прізвище

Нормоконтролер



Підпис, дата

С.І. Турецький

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:



Підпис, дата

доц. Неймак В.С.

Ініціали, прізвище

Зав. кафедри МАЕЕС

10 12 2025 р.

Хмельницький 2025

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту і архітектури
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем
Освітній рівень магістр
Галузь знань 13 «Механічна інженерія»
Шифр і назва
Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»
Шифр і назва
Освітня програма «Галузеве машинобудування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

к.т.н. доц. Неймак В.С.

Неймак В.С. 12 .2025р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Кравчук Денис Юрійович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Дослідження пристрою з електромагнітним приводом та двохкоординатною системою переміщення для ударної перфорації та маркування деталей

керівник роботи д.т.н., 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 10.12.2025

3. Вихідні дані до роботи Технічні характеристики обладнання з електромагнітним двигуном та швейних і взуттєвих матеріалів

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 експериментальної установки для дослідження технологічних режимів обладнання з ЛЕМД для виконання технологічної операції перфорування. 3. Дослідження робочих процесів обладнання з ЛЕМД для виконання операції перфорування. Висновки. Перелік джерел посилання.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) Аркуш 1. Лінійний електричний двигун. Документ огляловий (A1). Аркуш 2. Силова електромеханічна ударна система з пристроєм живлення. Схема структурна (A1). Аркуш 3. Пристрій живлення та керування силовою електромеханічною ударною системою. Схема структурна (A1). Аркуш 4. Пристрій з двохкоординатною системою руху та електромагнітним приводом. Документ ілюстраційний (A1). Аркуш 5, 6. Результати експериментальних досліджень. Документ дослідницький (A1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

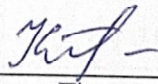
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

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 29.10.24р.	
2. Розробка експериментальної установки для дослідження технологічних режимів обладнання з ЛЕМД для виконання технологічної операції перфорування	до 11.11.24р.	
3. Дослідження робочих процесів обладнання з ЛЕМД для виконання операції перфорування	до 21.11.24р.	
4. Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу	до 12.12.24р.	

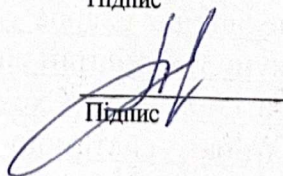
Студент



Підпис

Д.Ю. Кравчук
Ініціали, прізвище

Керівник роботи



Підпис

О.С. Поліщук
Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

до магістерської роботи студента
спеціальності 133 «Галузеве машинобудування».

1. Прізвище, ім'я та по батькові _____

Кравчук Денис Юрійович

2. Тема магістерської роботи Дослідження пристрою з електромагнітним приводом та двохкоординатною системою переміщення для ударної перфорації та маркування деталей

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента _____

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 6 арк., сторінок записки 84

5. Актуальність теми полягає у необхідності підвищення ефективності, точності та надійності технологічних операцій ударної перфорації та маркування деталей, що широко застосовуються в сучасних автоматизованих виробничих процесах. Використання пристроїв з електромагнітним приводом і двохкоординатною системою переміщення дає змогу забезпечити високу швидкість, стабільність ударних імпульсів і точне позиціонування робочого інструмента відносно оброблюваної деталі. Дослідження такого пристрою дозволяє проаналізувати вплив конструктивних, кінематичних і динамічних параметрів на якість перфорації та маркування, а також визначити раціональні режими його роботи. Отримані результати можуть бути використані для підвищення продуктивності, зниження енерговитрат і покращення експлуатаційних характеристик обладнання. Отже, тема магістерської роботи є актуальною з наукової та практичної точки зору. В роботі розроблено установку для дослідження пристрою з електромагнітним приводом та двохкоординатною системою переміщення для ударної перфорації та маркування деталей. В першому розділі проведено огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи. В другому здійснено розробку експериментальної установки для дослідження технологічних режимів обладнання з ЛЕМД для виконання технологічної операції перфорування. В третьому розділі виконано дослідження робочих процесів обладнання з ЛЕМД для виконання операції перфорування.

Підпис студента _____

" 10 " 12 20 25 р.

РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 2 від " 19 " 12 20 25 р.

Оцінка проекту ЕК Висхідно/А/100

Рекомендації ЕК Впровадження у галузевий процес

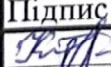

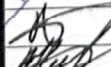
Особливі відмітки _____

Технічний секретар _____

" 19 " 12 20 25 р.

ЗМІСТ

	стор.
Вступ	6
1 Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи	8
1.1 Загальна характеристика процесів руйнування матеріалів, зокрема перфорації в легкій промисловості	8
1.2 Технологічні режими процесів ударного руйнування та їх вплив на якість виробів	12
1.3 Сучасні технічні рішення обладнання для виконання ударних операцій	17
1.4 Привод з лінійним електричним двигуном для імпульсних технологій	23
1.5 Обґрунтування типу лінійного електромагнітного двигуна для імпульсних технологій	26
1.6 Методи моделювання та експериментального дослідження ударних систем	31
1.7 Висновки до першого розділу	36
2 Розробка експериментальної установки для дослідження технологічних режимів обладнання з ЛЕМД для виконання технологічної операції перфорування	38
2.1 Структура силової електромеханічної системи ударної дії в пресовому обладнанні	38
2.2 Конструкція лінійного електромагнітного двигуна	41
2.3 Загальний вигляд розробленої конструкції ЛЕМД	43

МРМА25.00.00.000 ПЗ								
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата	Дослідження пристрою з електромагнітним приводом та двокоординатною системою переміщення для ударної перфорації та маркування деталей Пояснювальна записка	Літера	Аркуш	Аркушів
Виконав	Кравчук					М	4	84
Перевір.	Поліщук					ХНУ гр.МБм-24-1		
Н.контр.								
Затвер.	Неймак							

2.4	Схема живлення і керування силовою електромеханічною ударною системою в пресовому обладнанні легкої промисловості	45
2.5	Установка з двохкоординатною системою переміщення та мікроконтролерною системою керування	51
2.6	Розробка експериментальної установки для дослідження технологічних режимів пресового обладнання з ЛЕМД	54
2.4	Висновки до другого розділу	57
3	Дослідження робочих процесів обладнання з ЛЕМД для виконання операції перфорування	60
3.1	Мета проведення досліджень робочих процесів пристрою з ЛЕМД для виконання операції перфорування	60
3.2	Проведення експериментальних досліджень на пристрої з лінійним електромагнітним двигуном	62
3.3	Проведення експериментальних досліджень на пристрої з двохкоординатною системою	74
3.4	Висновки до третього розділу	76
	Висновки	78
	Перелік джерел посилання	80
	Додаток А	
	Додаток Б	

2.4	Схема живлення і керування силовою електромеханічною ударною системою в пресовому обладнанні легкої промисловості	45
2.5	Установка з двохкоординатною системою переміщення та мікроконтролерною системою керування	51
2.6	Розробка експериментальної установки для дослідження технологічних режимів пресового обладнання з ЛЕМД	54
2.7	Висновки до другого розділу	57
3	Дослідження робочих процесів обладнання з ЛЕМД для виконання операції перфорування	60
3.1	Мета проведення досліджень робочих процесів пристрою з ЛЕМД для виконання операції перфорування	60
3.2	Проведення експериментальних досліджень на пристрої з лінійним електромагнітним двигуном	62
3.3	Проведення експериментальних досліджень на пристрої з двохкоординатною системою	74
3.4	Висновки до третього розділу	76
	Висновки	78
	Перелік джерел посилання	80
	Додаток А	
	Додаток Б	

ВСТУП

Сучасний розвиток легкої промисловості характеризується зростанням вимог до якості фінішної обробки матеріалів, точності формоутворення елементів та стабільності технологічних операцій. Одним із ключових процесів, що забезпечує виготовлення деталей взуття, галантерейних виробів та текстильних компонентів, є локальне руйнування матеріалів – пробивання, вирубування та перфорація. Ці операції визначають не лише зовнішній вигляд виробів, але й їх функціональність, вентиляційні властивості, зносостійкість і можливість подальшого складання. Тому вибір конструкції ударної системи, параметрів її роботи та принципів керування має вирішальне значення для підвищення технологічного рівня виробництва [1-2].

У традиційних пресових машинах ударна дія формується за допомогою механічних, пневматичних або гідравлічних приводів, які характеризуються обмеженими можливостями регулювання імпульсних режимів, значною інерційністю та недостатньою повторюваністю ударних циклів. Це ускладнює забезпечення стабільної якості перфорації, особливо для матеріалів з різними фізико-механічними властивостями. У відповідь на ці виклики індустрія дедалі активніше впроваджує електромеханічні імпульсні приводи, зокрема лінійні електромагнітні двигуни (ЛЕМД), які дозволяють формувати точний, керований імпульс з мінімальними втратами енергії та високою швидкістю [3].

ЛЕМД як силові приводи ударної дії забезпечують низку суттєвих переваг: можливість регулювання енергії удару шляхом зміни електричних параметрів, відсутність проміжних механічних перетворювачів руху, підвищену точність позиціонування та адаптацію до широкого спектра технологічних режимів. Саме ці властивості роблять їх перспективною основою для створення сучасного пресового обладнання, здатного виконувати перфорацію матеріалів різної жорсткості на високому рівні точності та повторюваності.

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

Попри наявні переваги, питання вибору раціонального типу ЛЕМД, визначення оптимальних режимів його роботи та дослідження динамічних характеристик залишаються недостатньо опрацьованими у контексті технологій легкої промисловості. Складність ударного руйнування, короткочасність процесів, нелінійність напружено-деформованого стану матеріалів і висока швидкість взаємодії інструмента з поверхнею потребують комплексного підходу, який включає аналітичне моделювання, числові методи та експериментальні дослідження. Це створює необхідність у розробленні цілісної методики оцінювання та оптимізації імпульсних режимів пресового обладнання з ЛЕМД.

Актуальність даної магістерської роботи визначається потребою підвищення точності, ефективності та енергоощадності процесів ударного руйнування матеріалів у легкій промисловості шляхом використання сучасних електромеханічних приводів. Використання ЛЕМД у складі пресового обладнання дозволяє значно розширити технологічні можливості підприємств, підвищити якість перфорації та забезпечити автоматизацію складних операцій, що відповідає сучасним тенденціям розвитку виробництва та концепції Industry 4.0.

Метою роботи є дослідження технологічних режимів пресового обладнання з лінійним електромагнітним двигуном для виконання процесів ударного руйнування матеріалів, зокрема перфорації, та обґрунтування вибору параметрів системи живлення, керування й механічної частини приводу.

Таким чином, дана магістерська робота спрямована на комплексне вирішення актуальної задачі підвищення ефективності й точності технологічних операцій ударного руйнування шляхом використання високодинамічних електромагнітних приводів нового покоління.

					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 процесів руйнування матеріалів, зокрема перфорації в легкій промисловості

Процеси локального руйнування матеріалів, до яких належать пробивання, вирубування та перфорація, займають важливе місце в технологічних циклах легкої промисловості. Вони забезпечують формування отворів, контурів, зон ослаблення або функціональних елементів у деталях взуття, галантерейних виробів, текстильних заготовок та полімерних композиціях. Перфорація є різновидом керованого руйнування, у якому локальне навантаження перевищує межу міцності матеріалу і призводить до утворення отвору з чітко визначеною формою та геометрією. Висока якість перфорації визначає естетичні, функціональні й експлуатаційні властивості виробів, тому технологія виконання таких операцій є критично важливою для сучасного виробництва [4-5].

У легкій промисловості перфорація застосовується у кількох основних випадках [6-7]:

- створення декоративних малюнків на деталях верху взуття та галантерейних виробках;
- формування швейних отворів для подальшого прошивання;
- виготовлення вентиляційних отворів для підвищення повітропроникності виробів;
- створення посадочних місць для встановлення фурнітури (люверси, кнопки, блочки);
- виконання технологічних надрізів та кріпильних прорізів у текстильних матеріалах.

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

Матеріали, які піддаються перфорації, характеризуються різними механічними властивостями та структурою. Натуральна шкіра має анізотропну волокнисту будову, що впливає на форму руйнування залежно від напрямку прикладання навантаження. Штучні шкіри та полімерні композиції (ПВХ, ТПУ, мікрофібра) проявляють підвищену пружність та опір локальним деформаціям. Текстильні матеріали характеризуються здатністю зміщувати нитки без повного руйнування. Через це технологія перфорації повинна бути адаптована до конкретного матеріалу, а устаткування - забезпечувати точне регулювання енергетичних параметрів удару [8-9].

У промисловій практиці для виконання операцій перфорації застосовуються різні типи пресового та ударного обладнання, які відрізняються принципом дії, видом робочого органу та можливістю регулювання параметрів процесу. Основні групи обладнання включають:

1. Механічні пресові системи прямої дії [10]

До них належать ручні прес-пуансонні установки, механічні важільні штампи та ексцентрикові преси. Робочий інструмент - пуансон із різцем визначеної форми - рухається під дією маси маховика або важільного механізму.

Механічні преси прості у використанні та дешеві, однак мають істотні обмеження:

- нерегульована енергія удару;
- велика інерційність;
- обмежена повторюваність параметрів;
- неможливість точного позиціонування на складних контурах.

Такі системи застосовують переважно у малих майстернях, але вони не забезпечують високої автоматизації й стабільності процесу.

2. Пневматичні ударні та пресові установки [11]

Пневмопривід дозволяє створювати контрольовані зусилля, однак характеристика удару залежить від тиску в магістралі та інерційності системи подачі повітря.

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

Переваги:

- простота регулювання тиску,
- достатня потужність,
- можливість багаторазових циклів.

Недоліки:

- низька точність енергії імпульсу,
- запізнювання в системі керування,
- складність отримання малих або дуже точних ударів.

Пневматичні системи широко застосовують у взуттєвій промисловості, наприклад, для пробивання швейних отворів.

3. Гідравлічні пресові машини [12]

Гідравлічні преси забезпечують високу силу та точність керування тиском, однак вони характеризуються низькою швидкістю та неможливістю створення короткочасних імпульсів. Їх застосовують для пробивання товстих композиційних матеріалів або агресивних операцій штампування. Для декоративної та дрібної перфорації гідропривід неефективний через інерційність і обмежену частоту повторення ударів.

4. Електромеханічні імпульсні приводи (соленоїдні системи та ЛЕМД) [13]

Це найбільш сучасний тип приводу, що набуває поширення у легкій промисловості, зокрема у взуттєвій та швейній галузях завдяки високій точності та енергоефективності. Серед них виділяють:

- соленоїдні ударні приводи. Вони формують імпульс за рахунок швидкого намагнічування котушки. Недоліки: мала сила удару, високе нагрівання, неможливість тривалої роботи на великих енергіях;

- Лінійні електричні двигуни (ЛЕД), зокрема лінійні електромагнітні двигуни (ЛЕМД).

Це найбільш технологічно досконалі системи, що забезпечують:

- керовану енергію удару;
- високу швидкість;

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

- повторюваність імпульсів;
- енергоефективність завдяки імпульсному живленню;
- можливість автоматизації й інтеграції у роботизовані системи.

ЛЕД дозволяє здійснювати перфорацію матеріалів різної жорсткості - від натуральної шкіри до синтетичних композицій - із мінімальним зношенням інструмента та високою якістю отворів. Керування величиною удару забезпечується зміною напруги зарядки, ємності накопичувача енергії, тривалості імпульсу та переміщення ударника. Саме ці можливості роблять ЛЕД перспективними для сучасних автоматизованих систем перфорації взуттєвих деталей.

5. Комп'ютеризовані перфораційні комплекси (CNC)

Сучасні машини з ЧПК, що використовують пневмопривід, серводвигуни або ЛЕМД, дозволяють виконувати перфорацію за цифровими моделями, з високою точністю та відтворюваністю. Вони забезпечують:

- роботу з довільними траєкторіями;
- високу продуктивність;
- інтеграцію в CAD/CAM-середовища;
- мінімізацію людського фактору.

Однак більшість серійних рішень мають високу вартість, обмежений ресурс ударного вузла або недостатню енергетичну адаптивність для різних типів матеріалів.

Особливості процесу руйнування при перфорації

Процес утворення отвору складається з кількох етапів:

- локальна деформація матеріалу, коли пробійник починає взаємодію з поверхнею;
- проколювання, під час якого відбувається прорив волокон або полімерної плівки;
- вихід пробійника, що формує геометричну крайку;
- еластичне відновлення матеріалу, характерне для шкір і еластомерів.

Для забезпечення якісної перфорації необхідно, щоб енергія удару перевищувала роботу деформації, але не була надлишковою - це призводить до розривів і дефектів. Устаткування з фіксованою енергією удару не дозволяє реалізувати оптимальні режими для різних матеріалів, тому найбільш ефективними є системи з регульованою імпульсною дією [14].

Тенденції розвитку обладнання для перфорації

Сучасні виробничі вимоги орієнтуються на:

- автоматизацію та цифровізацію процесу перфорації;
- підвищення точності та якості отворів;
- зниження енергоспоживання;
- адаптацію режимів до конкретного матеріалу;
- можливість роботи за складними шаблонами.

Лінійні електромагнітні двигуни як ударні приводи відповідають цим вимогам завдяки високій керованості, швидкодії та повторюваності параметрів імпульсу. Інтеграція ЛЕМД у двохкоординатні системи забезпечує можливість виконання перфорації по довільних кривих, що є ключовим для виготовлення дизайнерських взуттєвих моделей.

1.2 Технологічні режими процесів ударного руйнування та їх вплив на якість виробів

Процеси ударного руйнування у легкій промисловості, зокрема перфорація, вирубування та пробивання отворів, характеризуються короткочасною, але інтенсивною дією інструмента на матеріал. Від правильного вибору технологічних режимів залежить не лише якість сформованих елементів, а й продуктивність обладнання, ресурс інструменту та стабільність технологічного процесу [15-16].

Основними параметрами, що визначають перебіг ударного руйнування, є:

- ударна енергія,
- швидкість,

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк. 12
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- прискорення ударника,
- величина робочого зазору між інструментом і опорною поверхнею,
- геометричні характеристики інструмента,
- напружено-деформований стан (НДС), що виникає у матеріалі під час удару. Кожен із цих параметрів задає фізичні умови ініціації та розвитку руйнування й визначає кінцевий результат обробки.

Ударна енергія як ключовий технологічний параметр

Ударна енергія є інтегральним показником інтенсивності впливу інструмента на заготовку. Саме вона забезпечує перевищення межі міцності матеріалу та ініціює утворення наскрізного отвору. Недостатня енергія призводить до часткового прорізання, деформації та зморшкування матеріалу, утворення задирок і волокнистих розривів. Надлишкова - до небажаних тріщин, розшарувань, надмірного розтягування країв, а також прискореного зношування пробійника.

Оптимальна ударна енергія залежить від:

- товщини й щільності матеріалу;
- типу структури (волокниста, плетена, пориста, полімерна);
- орієнтації волокон у шкірі та текстилі;
- наявності армуючих шарів;
- жорсткості опорної поверхні.

Для матеріалів із високою пружністю (наприклад, натуральної шкіри та термопластичних поліуретанів) енергія має забезпечувати швидке й чисте прорізання без розтягування. Для текстилю з відкритою структурою необхідне мінімальне пошкодження ниток та відсутність вторинних деформацій [17].

Швидкість та прискорення ударника

Ударний процес є надзвичайно динамічним, тому швидкість руху пробійника перед контактом із матеріалом відіграє ключову роль. Вона визначає:

- тривалість контакту інструмента з матеріалом;
- характер розвитку тріщини;
- ступінь локалізації напружень;

– формування зони пластичної деформації.

Висока швидкість сприяє чистому зрізу, оскільки час взаємодії мінімальний і матеріал не встигає деформуватися у площині. Це особливо важливо для синтетичних матеріалів, які мають тенденцію розтягуватися при повільному навантаженні.

Прискорення ударника впливає на рівномірність удару та на зношення інструмента. Надто великі прискорення можуть спричинити резонансні явища у механічних вузлах, що призводить до погіршення повторюваності ударів. Недостатні - викликають "зминання" матеріалу перед пробиванням і появу дефектів.

Вплив робочого зазору δ

Робочий зазор δ (відстань між інструментом, механічними упорами, підкладкою чи поверхнею, на якій лежить матеріал) формує умови взаємодії інструмента з матеріалом. Його величина визначає:

- величину початкової деформації перед пробиванням;
- швидкість наростання контактних навантажень;
- геометрію верхньої та нижньої крайки отвору;
- ступінь розшарування матеріалу.

Занадто малий δ призводить до сплюснення матеріалу і збільшення зони пластичної деформації, що особливо критично при роботі зі шкірою та багатошаровими текстильними матеріалами.

Занадто великий δ може спричинити неконтрольоване заклинювання інструмента або надмірну втрату енергії до моменту контакту.

Раціональний робочий зазор забезпечує оптимальні умови концентрації напружень у зоні різання і стабільний процес пробивання отворів.

Геометричні параметри інструмента та їх вплив

Пробійник - один із найважливіших факторів, що визначає якість перфорації. Його геометрія впливає на:

- форму та чистоту отвору;
- рівномірність розподілу зусиль;

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

- величину контактних напружень;
- знос ріжучої кромки.

Ключові параметри:

- кут загострення;
- радіус кривизни ріжучої крайки;
- товщина стінки пробійника;
- симетрія ріжучих поверхонь;
- твердість та зносостійкість матеріалу.

Для шкіри та полімерів рекомендовано гострі пробійники з мінімальним кутом загострення, що сприяє миттєвому ініціюванню тріщини. Для текстилю важливе точне формування отвору без «витягування ниток», тому використовують інструменти з удосконаленим профілем та електрополіруванням [18-19].

Невідповідність геометрії інструмента матеріалу призводить до таких дефектів, як:

- рвані краї,
- задирки,
- деформація,
- зміщення отворів
- нерівномірні контури.

Напружено-деформований стан матеріалу при перфорації

У момент удару в матеріалі формується складний напружено-деформований стан, який залежить від:

- жорсткості та анізотропії матеріалу;
- напрямку волокон;
- швидкості навантаження;
- температури та вологості;
- форми інструмента.

НДС включає локальне стискання у зоні контакту, розтягування в навколишніх ділянках та зсувні напруження, що ініціюють розвиток тріщини по контуру інструмента [20].

Для отримання чистого отвору необхідно забезпечити миттєве перевищення межі міцності з мінімальними деформаціями у сусідніх зонах.

При неправильних режимах можливі:

- неконтрольовані тріщини;
- нерівномірний зріз;
- часткове відшаровування шарів;
- розриви по лінії волокон;
- нерівна крайка отвору.

Особливо чутливими до НДС є натуральні шкіри, адже вони мають волокнисту структуру з неоднаковими властивостями в різних напрямках.

Комплексний вплив режимів на якість продукції

Взаємодія технологічних параметрів формує кінцевий результат перфорації. Загальні закономірності:

- ударна енергія визначає здатність пробивати матеріал;
- швидкість і прискорення контролюють якість зрізу;
- робочий зазор δ забезпечує правильну передачу зусилля;
- геометрія інструмента задає точну форму отвору;
- НДС матеріалу визначає характер руйнування.

Оптимізація цих параметрів забезпечує:

- рівномірність отворів;
- відсутність дефектів по краях;
- стабільність перфорації при серійній роботі;
- мінімальний знос інструмента;
- підвищення продуктивності обладнання.

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

1.3 Сучасні технічні рішення обладнання для виконання ударних операцій

Розвиток технологій у легкій промисловості зумовлює постійне вдосконалення пресового та ударного обладнання, яке використовується для виконання операцій пробивання, перфорації, висікання, установлення фурнітури, клепання та формування локальних зон руйнування матеріалу. Підвищення вимог до якості виробів, продуктивності та точності обробки стимулює впровадження сучасних приводних систем, автоматизованих режимів керування, адаптивних інструментів і енергоощадних технологій. У результаті на ринку представлено широкий спектр пресового обладнання, яке відрізняється кінематикою, принципом дії, конструктивним виконанням і функціональними можливостями.

Механічні та ексцентрикові преси (рис.1.1) [21]



Рисунок 1.1 - Прес для установки фурнітури Mareew ML 808

Однією з найпоширеніших груп машин для ударних операцій у легкій промисловості є механічні та ексцентрикові преси. Їхній привід заснований на використанні кривошипно-повзунних або ексцентрикових механізмів, які забезпечують періодичну подачу енергії удару до робочого органу. Основними перевагами

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

таких пресів є простота конструкції, висока надійність та відносно низька вартість. Вони широко застосовуються для перфорації шкіри, картону, декоративних панелей, для висікання елементів взуттєвих заготовок та підготовки деталей перед збиранням.

Сучасні ексцентрикові преси оснащуються електронними системами керування, які дозволяють регулювати частоту ударів, контролювати положення повзунка та автоматично відключати подачу при виявленні перевантаження або заклинювання інструмента. Однак істотним недоліком механічних рішень залишається неможливість точного регулювання енергії удару, оскільки вона залежить переважно від кінематики механізму, а не від керованих електричних параметрів.

Пневматичні та гідравлічні ударні системи (рис.1.2, 1.3) [22]



Рисунок 1.2 - Прес пневматичний RVT3600

Пневматичні та гідравлічні преси є сучаснішою альтернативою механічним машинам. Вони дозволяють створювати значні зусилля при менших габаритах і масі приводу. Пневматичні приводи застосовуються для перфорації тонких

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

матеріалів, маркування, штампування та встановлення декоративної фурнітури.

Пневматичні преси характеризуються:

- плавним регулюванням зусилля;
- можливістю керування швидкістю ходу штока;
- високою частотою повторень ударних циклів;
- простотою інтеграції з автоматизованими лініями.

Гідравлічні преси забезпечують значно більші енергетичні можливості та підходять для операцій обробки товстих або багатошарових матеріалів. Вони застосовуються для пробивання гумових пластин, шкіри підошовного матеріалу, багатошарових текстильних пакетів, жорстких синтетичних полотен. Недоліками гідравлічних систем є складність системи подачі рідини, потреба в регулярному технічному обслуговуванні та відносно низька швидкість циклу порівняно з механічними або електромагнітними системами [23].



Рисунок 1.3 – Гідравлічний прес з поворотною траверсою

Електромеханічні преси на основі соленоїдних та електромагнітних приводів (1.4)

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

У сучасному виробництві зростає інтерес до електромеханічних ударних систем, у яких удар формується за рахунок електромагнітного поля. На відміну від механічних та пневматичних аналогів, такі системи забезпечують:

- миттєвий розгін ударника;
- точне дозування енергії імпульсу;
- високу повторюваність ударів;
- низькі енергетичні втрати між циклами;
- можливість програмного керування профілем руху [24].



Рисунок 1.4 - Електромагнітний прес для встановлення металофурнітури

Соленоїдні приводи, силові котушки та імпульсні електромагніти застосовуються для перфорації шкіри, картону, хутра, штучних матеріалів, а також для пробивання декоративних отворів різної конфігурації. Такі системи особливо ефективні в умовах автоматизованого виробництва, де потрібна висока швидкість зміни режимів і точне позиціонування інструмента.

Суттєвою перевагою електромагнітних систем є відсутність інерційного механічного зв'язку між джерелом енергії та ударником, що дозволяє миттєво змінювати технологічні режими та адаптувати систему під матеріал будь-якої жорсткості.

Преси з числовим програмним керуванням (ЧПК) [25]

Для виконання складних перфораційних контурів, декоративних малюнків, отвірних матриць та ідентифікаційного маркування все ширше використовуються ударні системи з ЧПК. Таке обладнання поєднує:

- координатні столи або порталні системи;
- електромеханічний чи пневматичний ударний привід;
- систему керування на базі мікроконтролера або промислового ПК;
- програмне забезпечення для автоматичної генерації траєкторій.

ЧПК-преси дозволяють виконувати перфорацію за складними шаблонами без участі людини, забезпечуючи високу повторюваність геометрії отворів, мінімальні відхилення та можливість швидкої зміни виробу. Такі системи особливо актуальні у виробництві взуття та текстильних декоративних елементів.

- Лазерні перфораційні установки як альтернативне рішення

У деяких сегментах легкої промисловості ударні методи доповнюються або замінюються лазерною перфорацією. Лазери забезпечують:

- безконтактну обробку;
- мінімальний вплив механічних навантажень на матеріал;
- можливість формування мікроотворів;
- точність та відсутність задирок.

Однак лазерна обробка має свої обмеження: термічний вплив на матеріал, зміна кольору або структури шкіри, низька енергоефективність при великій товщині заготовки. Тому у багатьох випадках ударні пресові системи залишаються незамінними.

Комбіновані ударні системи

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

Сучасні технологічні лінії дедалі частіше використовують комбіновані рішення, що поєднують різні типи приводів або різні механізми подачі енергії. Прикладами можуть бути:

- пневмоелектромагнітні системи, де пневмопривід забезпечує попереднє позиціонування, а електромагніт - ударний імпульс;
- електрогідравлічні установки для товстих матеріалів;
- модульні ударні модулі, інтегровані у роботизовані комплекси.

Такі системи поєднують гнучкість керування з високою енергетичною потужністю, що забезпечує універсальність обладнання.

Основні тенденції розвитку ударного пресового обладнання

У сучасному машинобудуванні для легкої промисловості простежуються такі тенденції:

Енергетична ефективність

Впровадження імпульсних джерел живлення, рекуперації енергії та адаптивного керування дозволяє зменшити споживання електроенергії [26].

Підвищення точності удару

Застосування датчиків переміщення, високошвидкісної електроніки та математичних моделей дає змогу точно керувати профілем імпульсу.

Гнучкість та універсальність

Конструкції стають модульними, що дозволяє легко замінювати інструменти й адаптувати обладнання під різні вироби.

Інтеграція до цифрових виробничих систем

Преси з ЧПК та мережевими інтерфейсами інтегруються у CAD/CAM-системи та автоматизовані лінії Industry 4.0.

Підвищення ресурсу інструмента

Використовуються зносостійкі сталі, тврдосплавні напайки та обробка поверхні інструмента методами PVD- і CVD-покриттів.

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

1.4 Привод з лінійним електричним двигуном для імпульсних технологій

Приводи, що використовуються в обладнанні для імпульсних технологічних операцій, проектують з урахуванням специфічних вимог до енергетичних показників, кінематичних характеристик переміщення робочого органу та можливості точного регулювання ударної дії. На відміну від традиційних електромеханічних систем, орієнтованих переважно на тривалий сталий обертовий режим і стабільну потужність, імпульсні приводи працюють у режимі короткочасних, але високоенергетичних циклів з інтенсивним розгоном і швидким гальмуванням рухомої ланки. Тому до таких приводів висуваються вимоги не лише за питомою потужністю та енергоефективністю, а й за умовами формування ударного імпульсу, величиною силової дії, швидкістю переміщення та повторюваністю циклів [27].

Лінійні електричні двигуни становлять окрему групу електроприводів, принципова відмінність яких від двигунів обертової дії полягає у здатності безпосередньо формувати прямолінійний поступальний або зворотно-поступальний рух робочого органу без застосування проміжних механічних перетворювачів руху. На відміну від обертових електродвигунів, що працюють у режимі безперервного обертання з майже сталою потужністю і рівномірним енергоспоживанням, лінійні двигуни функціонують у режимі дискретного перетворення енергії. Подача енергії здійснюється у вигляді окремих імпульсів, які забезпечують розгін рухомої частини, створення ударної дії, виконання технологічної операції та подальше повернення приводу в початкове положення. Така організація процесу дає можливість точно дозувати енергію удару, узгоджувати момент його реалізації з іншими стадіями технологічного циклу та зменшувати середнє споживання електроенергії обладнання [28].

Ключова перевага лінійних приводів з безпосереднім перетворенням електричної енергії в кінетичну енергію поступального руху полягає у відсутності проміжних механічних ланок – редукторів, кривошипно-шатунних механізмів, ремінних чи зубчастих передач. Це суттєво знижує втрати на тертя, підвищує загальну

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк. 23
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

жорсткість конструкції, покращує точність позиціонування робочого органу та спрощує компоновку пресового обладнання. Додатковою перевагою є широкий діапазон регулювання зусилля та швидкості, що реалізується коригуванням електричних параметрів системи – напруги, струму, амплітуди й тривалості імпульсу, частоти повторення циклів. У результаті лінійні електричні двигуни розглядаються як особливо придатні для імпульсних технологічних процесів, де критично важливими є висока повторюваність ударної дії та точність формування енергетичного імпульсу.

Водночас за коефіцієнтом корисної дії та коефіцієнтом потужності лінійні електричні двигуни, як правило, поступаються електродвигунам обертового типу. Це зумовлено імпульсним характером навантаження, складнішою конфігурацією магнітної системи, підвищеними втратами в електричних і магнітних колах. Проте безпосереднє порівняння цих типів двигунів є не зовсім коректним, оскільки в практичних умовах аналізують не окремий двигун, а функціонування всієї електромеханічної системи. Для пресових і ударних машин застосування обертових двигунів потребує використання проміжних механічних передач – кривошипних механізмів, редукторів, маховиків, що створює механічний та енергетичний «баласт». Частина енергії витрачається на приведення в рух мас, які безпосередньо не беруть участі у виконанні технологічної операції. Зокрема, у пресах з кривошипним приводом до 40 % енергії, накопиченої в маховику, не використовується у робочому ході, що суперечить принципам енергоощадних імпульсних технологій [28-29].

Згідно з конструктивним принципом дії, лінійні електричні двигуни класифікують на індукційні, електродинамічні, магнітоелектричні, магнітострикційні, електрострикційні, індукційно-динамічні та електромагнітні, кожен з яких характеризується власним діапазоном тягового зусилля, швидкодії, амплітуди ходу, конструктивної складності та енергетичних показників. Індукційні лінійні двигуни мають складну конструкцію, порівняно невелику питому силу тяги та значну

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

масу активних матеріалів. Розміщення частини обмоток на рухомій частині ускладнює їх використання в ударних режимах через проблеми з надійністю і тепловідведенням, тому як приводи пресового обладнання вони практично не застосовуються.

Електродинамічні лінійні двигуни вирізняються підвищеною швидкістю та кращими питомими показниками, проте їхній розвиток обмежено низькою динамічною міцністю рухомої частини, складністю системи керування та чутливістю до високих ударних навантажень. Це значно знижує доцільність їх використання в силових пресових системах. Магнітоелектричні приводи, попри високі зусилля у двигунах із постійними магнітами, нині використовуються обмежено через вартість і дефіцитність магнітних матеріалів, складні схеми живлення та невисокі значення питомої потужності. Водночас розвиток магнітних матеріалів на основі рідкоземельних металів теоретично розширює перспективи їх застосування.

Магнітострикційні та електрострикційні двигуни надійно працюють у пристроях вібраційного типу, де потрібні дуже малі переміщення з високою частотою, однак обмежені значення ходу і силової дії роблять їх непридатними для реалізації повноцінних ударних операцій у силових пресових приводах. Індукційно-динамічні двигуни поєднують переваги електродинамічних та електромагнітних систем, забезпечують високий рівень питомої сили тяги, але через надмірну швидкість та жорсткі вимоги до джерел живлення застосовуються переважно у спеціальних машинах [30-31].

Найбільш придатним для реалізації імпульсних технологічних процесів є клас лінійних електромагнітних двигунів. Такі двигуни здатні створювати значні зусилля на відносно великій довжині робочого ходу, забезпечують стабільність ударного імпульсу, відносну простоту системи керування та широкі можливості адаптації до умов конкретного технологічного процесу. Лінійні електромагнітні двигуни дають змогу реалізувати прямий привід без використання механічних передавальних механізмів, забезпечують швидке регулювання зусилля та частоти

ходів, легко інтегруються в мікропроцесорні системи керування, не створюють надмірних вібрацій і інерційних навантажень на несівну конструкцію обладнання.

Світовий досвід проектування пресового обладнання свідчить, що саме електромагнітні лінійні приводи найчастіше зустрічаються в сучасних патентних рішеннях, особливо в галузі високошвидкісних та імпульсних технологій. Водночас широке застосування ЛЕД, зокрема ЛЕМД, у легкій промисловості обмежується відсутністю стандартизованих серій двигунів відповідних параметрів, недостатньою розробленістю методик їх розрахунку та проектування, обмеженим обсягом експериментальних досліджень і відносно низькими значеннями ККД у типових конструкціях (10...35 %), зумовленими втратами в обмотках, магнітному колі та вихровими струмами.

Утім, для імпульсних технологічних процесів ККД двигуна не є визначальним критерієм. Пріоритетними стають точність дозування енергії удару, стабільність повторюваності імпульсів, ресурс елементів приводу та можливість інтеграції в автоматизовані системи керування. За сукупністю цих показників електромагнітні лінійні приводи забезпечують раціональний компроміс між конструктивною простотою, технологічною ефективністю та енергетичною доцільністю, що дозволяє розглядати їх як перспективний варіант приводу для сучасного пресового обладнання імпульсної дії.

1.5 Обґрунтування типу лінійного електромагнітного двигуна для імпульсних технологій

Обґрунтування типу лінійного електромагнітного двигуна для імпульсних технологій ґрунтується на аналізі його тягових та кінематичних характеристик, які безпосередньо визначають можливість реалізації заданого закону руху робочого органу пресового обладнання. До ключових параметрів належать довжина робочого ходу та характер зміни електромагнітної сили вздовж цього ходу. Саме ці показники визначають, чи зможе привід забезпечити необхідну форму діаграми

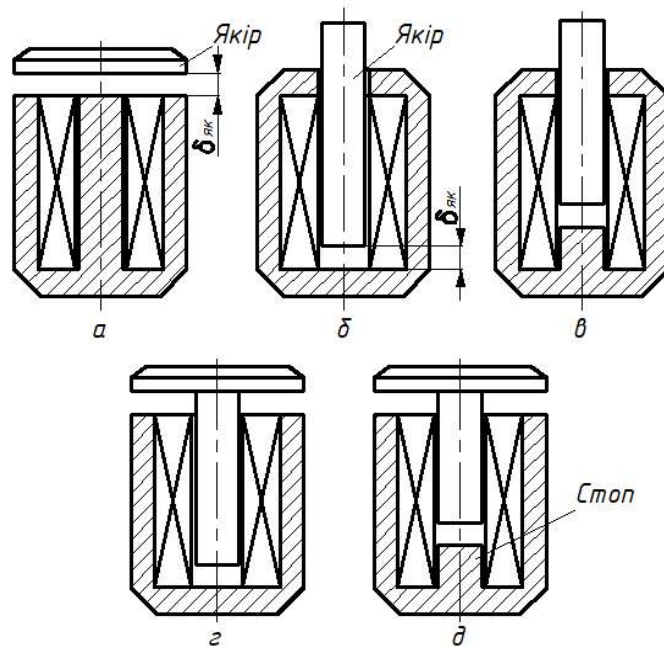
					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		26

зусиль і переміщень, узгоджену з вимогами технологічного процесу руйнування, зокрема перфорації матеріалів легкої промисловості.

У спеціалізованих роботах з теорії лінійних електромагнітних двигунів наведено класифікацію таких машин за ознаками, пов'язаними з будовою магнітної системи, варіацією робочого зазору, площею полюсної поверхні, кількістю витків обмотки та магнітними властивостями матеріалів. Змінюючи ці параметри окремо або в поєднанні, можна сформувати різні типи ЛЕМД, які відрізняються як формою тягової характеристики, так і рівнем енергетичних показників. Теоретично можливий широкий спектр варіантів конструкцій, проте в промисловості практичне застосування одержали лише ті, що забезпечують прийнятний компроміс між силовими характеристиками, габаритами, технологічністю виготовлення та надійністю вимоги до джерел живлення застосовуються переважно у спеціальних машинах [32].

Для силових імпульсних систем пресового обладнання, що працюють у режимах короткочасної ударної дії, найбільше поширення отримали лінійні електромагнітні двигуни так званого δ -типу. Їх відмінною ознакою є те, що керування силою тяги та енергетичними параметрами здійснюється переважно через зміну величини робочого зазору, тоді як інші параметри магнітної системи залишаються сталими. Це дозволяє формувати потрібний характер наростання тягового зусилля при відносно простій конструкції та високій технологічності виготовлення. Основні різновиди ЛЕМД δ -типу наведено на рис. 1.5: двигуни з якорем, що притягується; з якорем, що втягується без стопа; з якорем, що втягується зі стопом; конструкції з комбінованим якорем без стопа та з комбінованим якорем і стопом.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		27



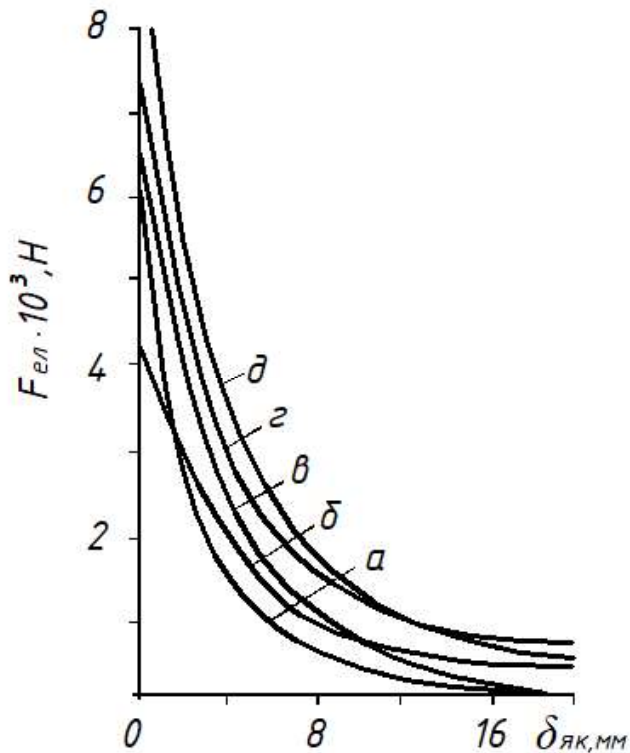
- а – з якорем, що притягується; б – якорем, що втягується без стопа;
 в – якорем, що втягується зі стопом; г – комбінованим якорем без стопа;
 д – комбінованим якорем і стопом

Рисунок 1.5 - Конструкції двигунів δ -типу

Кожен із цих варіантів має свою специфіку розподілу магнітного потоку та, відповідно, власну форму тягової характеристики.

Експериментальні дослідження статичних тягових характеристик циліндричних ЛЕМД δ -типу показали, що всі вони мають спільну рису: тягове зусилля зростає до кінця робочого ходу, але характер цього зростання може бути як більш плавним, так і різкішим (рис. 1.6).

Відмінності стосуються переважно рівня початкової сили тяги та величини кінцевого зусилля. Двигуни з якорем, що притягується, а також з якорем, що втягується зі стопом, мають дуже мале початкове тягове зусилля, яке практично наближається до нуля. Це означає, що на початку ходу вони створюють незначний силовий вплив, а значне зростання зусилля відбувається ближче до кінцевого положення якоря. В інших конструкцій (наприклад, з комбінованим якорем) початкова сила тяги є помітною вже на старті, що важливо для операцій, які потребують реалізації квазістатичного режиму або попереднього підтиснення матеріалу.



- а – якорем, що притягується; б – якорем, що втягується без стопа;
 в – якорем, що втягується зі стопом; г – комбінованим якорем без стопа;
 д – комбінованим якорем і стопом

Рисунок 1.6 - Тягові характеристики ЛЕМД δ - типу з:

Початкове тягове зусилля можна підвищувати двома основними шляхами. Перший полягає у цілеспрямованій зміні геометричних параметрів магнітної системи – форми полюсів, довжини та конфігурації робочого зазору, розташування якоря відносно осі симетрії магнітопроводу. Оптимізуючи ці параметри, можна сформуванати потрібну форму тягової характеристики: забезпечити наявність невеликого, але стабільного початкового зусилля, плавне наростання сили тяги та досягнення максимального значення в кінці ходу. Другий шлях полягає у використанні автономного магнітного накопичувача, який забезпечує попереднє намагнічення магнітної системи за нерухомого якоря. У цьому випадку частина магнітної енергії накопичується до моменту пуску, що дозволяє істотно збільшити початкове тягове зусилля без надмірного зростання габаритів двигуна.

Вибір конкретного типу ЛЕМД має враховувати характер зміни технологічного зусилля при виконанні різних операцій руйнування, зокрема перфорації, вирубування, осадки або формоутворення матеріалу. Для більшості таких процесів, характерних для легкої промисловості, максимальне технологічне зусилля має виникати наприкінці ходу робочого органу, коли пробійник або штамп проходить найбільш навантажену ділянку матеріалу (фаза прориву або остаточного формування контуру). Тому доцільно, щоб тягові характеристики приводу відповідали цьому вимогу – тобто забезпечували істотне зростання електромагнітної сили саме в кінцевій зоні ходу.

Порівняльний аналіз тягових характеристик різних конструкцій ЛЕМД δ -типу (рис. 1.6) показує, що всі вони в тій чи іншій мірі задовольняють умову зростання зусилля до кінця ходу, але найбільш вигідними з точки зору інтегральної роботи та кінцевого тягового зусилля є двигуни з комбінованим якорем і стопом. У таких конструкціях поєднуються переваги варіантів з притягуємим і втягуємим якорем: забезпечується достатнє початкове зусилля для стабільного запуску процесу та значне зростання сили тяги в кінцевій фазі, що дозволяє реалізувати енергоємні операції перфорації навіть для жорстких та багатошарових матеріалів. Крім того, наявність стопа забезпечує чітке обмеження ходу якоря, підвищує повторюваність циклів та полегшує конструювання упорів і систем захисту.

Циліндричні ЛЕМД δ -типу, зокрема з комбінованим якорем і стопом, мають ще кілька важливих переваг з точки зору практичної реалізації у пресовому обладнанні. Вони відзначаються відносною простотою конструкції, зручністю виготовлення основних деталей з типових електротехнічних матеріалів, придатністю до серійної механічної обробки та невисокою трудомісткістю складання. Циліндрична форма полегшує інтеграцію двигуна у пресові вузли, дозволяє компактно розташувати його у вертикальній або горизонтальній орієнтації, а також забезпечує хороші умови охолодження при імпульсних режимах роботи.

Практичний досвід застосування ЛЕМД у машинобудуванні та електротехнічній промисловості підтверджує, що двигуни δ -типу можуть ефективно використовуватися як силові приводи ударної дії для широкого спектра операцій – штампування, різання, вирубування, витягування, пробивання, клеймування, формування, запресовування елементів фурнітури тощо. За наявності змінного технологічного оснащення (наборів штампів, пробійників, матриць) один і той самий привід може виконувати різні операції без принципової зміни конструкції двигуна, що є важливою перевагою для гнучких виробничих систем у легкій промисловості.

Підсумовуючи результати аналізу, можна стверджувати, що для реалізації імпульсних технологій руйнування в пресовому обладнанні легкої промисловості доцільно обирати лінійні електромагнітні двигуни δ -типу циліндричної конструкції, у тому числі з комбінованим якорем і стопом. Вони забезпечують сприятливий характер тягової характеристики – зростання зусилля до кінця ходу, високі інтегральні енергетичні показники, достатню початкову силу тяги, простоту конструкції та технологічність виготовлення. Саме ці властивості дають підстави розглядати ЛЕМД δ -типу як раціональну базу для створення силових електромеханічних ударних систем пресового обладнання, призначеного для виконання операцій перфорації та інших процесів ударного руйнування в легкій промисловості.

1.6 Методи моделювання та експериментального дослідження ударних систем

Дослідження ударних систем потребує поєднання аналітичних, числових та експериментальних методів. Оскільки процеси ударного руйнування характеризуються короткотривалими, динамічними та нелінійними явищами, пов'язаними з високими швидкостями руху робочого органу, значними миттєвими деформаціями та складним напружено-деформованим станом матеріалу, для їх аналізу необхідне використання комплексу моделей і засобів вимірювання. Раціональне

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

поєднання методів дозволяє точно оцінити вплив конструктивних параметрів, технологічних режимів і зовнішніх факторів на якість перфорації та ефективність роботи ударних механізмів [32-34].

Аналітичні методи моделювання

Аналітичний підхід оснований на класичній механіці твердого тіла, теорії пружності й пластичності, а також енергетичних рівняннях ударних процесів. Основною метою аналітичних моделей є встановлення узагальнених залежностей між параметрами ударної системи: масою ударника, швидкістю перед ударом, жорсткістю зворотних елементів, енергією імпульсу та фізико-механічними властивостями матеріалу.

Аналітичні методи дозволяють:

- визначити передударну швидкість ударника залежно від енергії джерела;
- оцінити необхідну ударну енергію для забезпечення пробивання матеріалів різної товщини й жорсткості;
- встановити критичні значення напружень, за яких відбувається руйнування;
- проаналізувати умови стійкого руйнування або його зриву;
- сформулювати початкові припущення щодо вибору режимів роботи обладнання.

Незважаючи на спрощення, аналітичні моделі є важливим інструментом попереднього проектування, оскільки дають можливість швидко проаналізувати вплив основних факторів без проведення дорогих експериментів.

Числове моделювання та комп'ютерні методи

Сучасні ударні системи мають складну конструкцію й працюють у високоінтенсивних динамічних режимах, тому аналітичні моделі часто не можуть відобразити реальні умови з достатньою точністю. Для цього застосовують числові методи, такі як:

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		32

1. Метод скінченних елементів (МСЕ) - використовується для визначення напружено-деформованого стану інструмента та матеріалу заготовки у режимі короткотривалого навантаження. МСЕ дозволяє моделювати локальні концентрації напружень, еластопластичні деформації, напрямки поширення тріщин та ймовірність появи дефектів по краях отвору.

2. Методи динамічної симуляції (Explicit Dynamics) - використовуються для аналізу швидкоплинних процесів з частками мілісекундної тривалості. Такі моделі враховують інерційні ефекти, контактні взаємодії та тертя між пробійником і матеріалом.

3. Енергетичні моделі ударних імпульсів - застосовуються для оцінки часу взаємодії, втрат енергії в конструкції та ефективності передачі імпульсу.

Комп'ютерне моделювання дозволяє виявити:

- як змінюється геометрія деформацій навколо зони удару;
- які ділянки інструмента зазнають максимальних навантажень;
- оптимальний профіль пробійника для конкретного типу матеріалу;
- вплив зміни жорсткості опорних елементів на якість перфорації;
- поведінку шаруватих і композитних матеріалів, у яких зона руйнування є складною та багатоступеневою.

Такі моделі значно підвищують точність прогнозування та дозволяють зменшити кількість натурних експериментів.

Методи експериментального дослідження ударних систем

Експериментальні методи є ключовим елементом дослідження, оскільки дозволяють перевірити достовірність аналітичних і числових моделей, а також визначити параметри, які неможливо коректно отримати теоретичним шляхом.

До основних експериментальних методів належать:

1. Вимірювання параметрів ударного імпульсу

Використовуються:

- тензодатчики для фіксації навантаження;
- акселерометри для реєстрації прискорень ударника;

- датчики переміщення для вимірювання переміщення та швидкості;
- струмові та напругові датчики (у випадку електромеханічних приводів).

Отримані дані дозволяють побудувати часові залежності сили, переміщення та швидкості, які є ключовими для оцінки ударної енергії.

2. Високошвидкісна відеозйомка

Метод застосовується для реєстрації моменту контакту інструмента з матеріалом, швидкості розвитку тріщини, а також для оцінки поведінки матеріалу у зоні деформації. Відео зі швидкістю 1000–5000 кадрів/с дозволяє точно визначити:

- наявність попереднього сплюснення;
- стабільність руху ударника;
- характер відриву частинок матеріалу.

3. Аналіз геометрії сформованого отвору

Після завершення процесу виконують вимірювання:

- діаметра та допусків форми;
- шорсткості крайок;
- наявності задирок і тріщин;
- залишкових деформацій навколо отвору.

Ці параметри безпосередньо визначають якість перфорації.

4. Мікроскопічні методи

Для більш глибокого аналізу використовують оптичні та цифрові мікроскопи, які дають змогу оцінити:

- мікрорельєф зрізу;
- наявність мікротріщин;
- характер руйнування волокон у тканинах і шкірі;
- ступінь термічних і механічних пошкоджень.

5. Випробування інструмента на зносостійкість

Регулярне повторення ударних дій призводить до затуплення ріжучої крайки. Тому проводять:

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- періодичні вимірювання профілю крайки;
- аналіз зміни радіуса заокруглення;
- визначення межі, після якої погіршується якість перфорації.

Це дозволяє оцінити ресурс пробійника та економічну ефективність процесу.

Методи планування експериментів у дослідженні ударних систем [35]

Для зменшення обсягу експериментальних робіт та отримання статистично достовірних результатів застосовують багатофакторні плани експерименту. Основні переваги:

- можливість одночасного дослідження впливу кількох технологічних параметрів;
- отримання регресійних математичних моделей виду $Y = f(x_1, x_2, x_3 \dots)$;
- виявлення взаємодій між факторами, які часто визначають якість процесу;
- визначення області оптимальних режимів роботи ударних систем.

Найчастіше застосовують:

- повні факторні експерименти;
- некомпозиційні плани другого порядку;
- ротатабельні плани;
- центральні-композиційні схеми.

Методи планування експерименту дозволяють суттєво підвищити ефективність дослідження, особливо коли зміна одного параметра впливає на декілька характеристик одночасно.

Об'єднання результатів моделювання та експерименту

Комплексний підхід передбачає:

- аналітичне оцінювання початкових параметрів;
- числове моделювання для уточнення напружено-деформованого стану та поведінки матеріалу;

- експериментальні дослідження для валідації моделі та визначення реальних відхилень.

Об'єднання результатів дозволяє:

- сформулювати повну математичну модель ударної системи;
- отримати похідні параметри, недоступні для прямого вимірювання;
- визначити джерела похибок та компенсувати їх;
- оптимізувати конструкцію інструмента і режими роботи.

Методи моделювання та експериментального дослідження ударних систем створюють комплексну наукову основу для проектування та вдосконалення пресового обладнання в легкій промисловості. Поєднання аналітичних, числових та експериментальних методів дає можливість всебічно вивчити процеси ударного руйнування, визначити оптимальні технологічні режими та забезпечити стабільну якість перфорації у широкому спектрі матеріалів.

1.7 Висновки до першого розділу

У першому розділі узагальнено особливості процесів локального руйнування матеріалів у легкій промисловості та розглянуто обладнання, що застосовується для перфорації, пробивання й вирубування деталей. Показано, що якість таких операцій визначається властивостями матеріалів та точністю реалізації ударних режимів, зокрема енергії, швидкості, робочого зазору та геометрії інструмента. Для натуральних і штучних шкір, текстильних матеріалів і полімерів ці параметри мають бути ретельно узгоджені, оскільки вони безпосередньо впливають на чистоту зрізу, форму отворів та стабільність процесу.

Проаналізовано механічні, пневматичні, гідравлічні й електромеханічні системи ударної дії. Традиційні приводи забезпечують базовий рівень технологічності, але мають обмеження щодо регулювання енергії, повторюваності циклів і точності позиціонування. Натомість електромагнітні приводи, особливо лінійні електромагнітні двигуни (ЛЕМД), демонструють кращу керованість імпульсом,

високу швидкість та можливість інтеграції в автоматизовані системи та двохкоординатні комплекси.

У розділі обґрунтовано доцільність застосування ЛЕМД δ -типу для імпульсних технологій, оскільки вони забезпечують зростання тягового зусилля в кінці ходу, мають просту конструкцію та відповідають енергетичним вимогам перфорації й вирубування матеріалів. Їх характеристики узгоджуються з потребами процесів, де максимальні навантаження виникають у завершальній фазі ходу пробійника.

Наведено огляд аналітичних, числових (метод скінченних елементів, динамічне моделювання) та експериментальних методів дослідження ударних систем, що дозволяють визначити напружено-деформований стан, контрольні параметри удару та вплив факторів на якість отворів. Підкреслено, що комплексне використання моделювання й натурних вимірювань створює наукову основу для оптимізації технологічних режимів і конструювання обладнання.

У цілому встановлено, що найбільш перспективним напрямом розвитку ударного пресового обладнання є використання ЛЕМД δ -типу, які здатні забезпечити якісну, керовану й енергоефективну перфорацію матеріалів легкої промисловості, що визначає актуальність подальших досліджень у наступних розділах.

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

2 РОЗРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ ОБЛАДНАННЯ З ЛЕМД ДЛЯ ВИКОНАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ОПЕРАЦІЇ ПЕРФОРУВАННЯ

2.1 Структура силової електромеханічної системи ударної дії в пресовому обладнанні

Технологічні операції легкої промисловості, що виконуються з використанням лінійних електричних двигунів (ЛЕД), потребують обґрунтованого вибору типу магнітної системи, схеми живлення та принципів керування. Незалежно від конструктивного виконання, силову електромеханічну ударну систему пресового обладнання доцільно розглядати як комплекс, який включає технологічну частину та енергетичний канал.

Структурна схема СЕМУС наведена на рис. 2.1 і демонструє функції та взаємодію всіх основних елементів. Початковою ланкою системи є електрична мережа, що забезпечує надходження енергії до пресового обладнання. Її параметри визначають стабільність напруги живлення і, відповідно, режими роботи елементів силового каналу. Для такого обладнання висувуються підвищені вимоги до якості мережі: здатність витримувати імпульсні струмові навантаження, можливість роботи при високочастотних складових та мінімізація коливань напруги, що виникають при увімкненні СЕМУС [36].

Перетворювач енергії (ПЕ) виконує адаптацію електричної енергії мережі до параметрів живлення системи. У його складі функціонує ємнісний накопичувач енергії (НЕ), який є найбільш придатним для імпульсних ударних систем. Як накопичувачі використовують імпульсні конденсатори, а магнітний накопичувач — інтегрований у СЕМУС або виконаний автономно у вигляді пристроїв утримання якоря. В обох випадках він завчасно акумулює магнітну енергію в індуктивностях системи за нерухомого якоря [36-37].

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

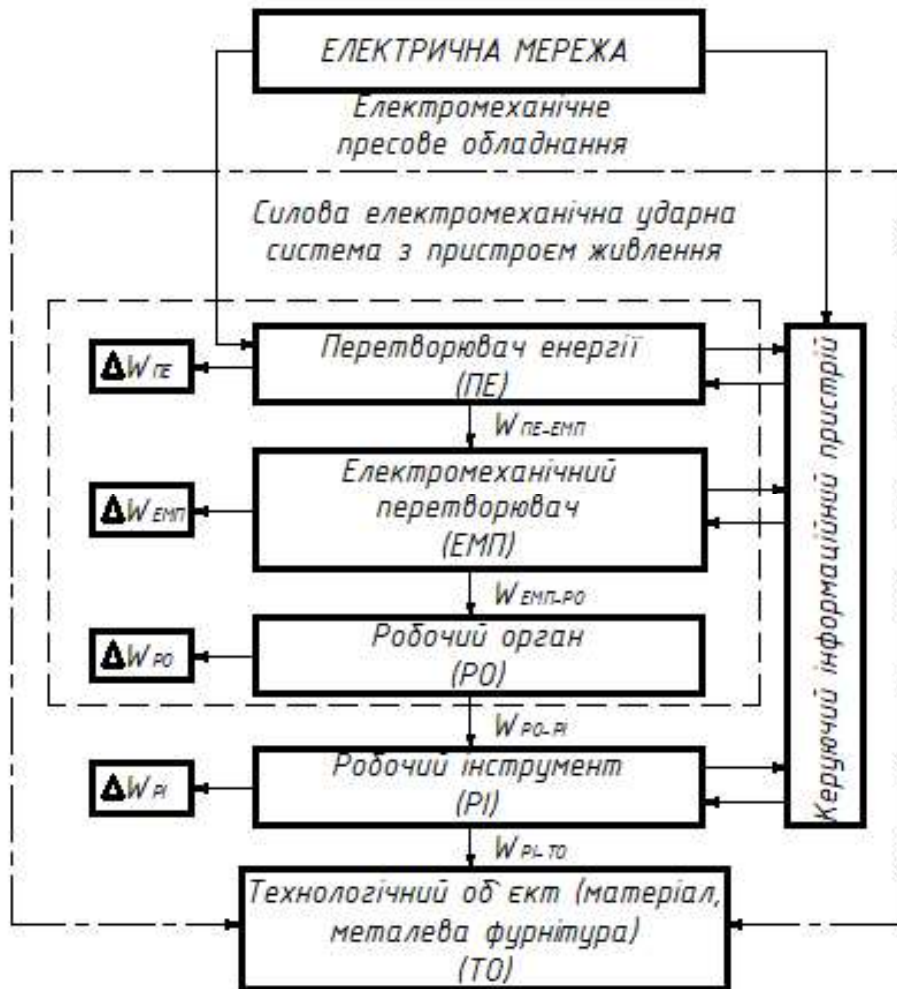


Рисунок 2.1 - Структурна схема розподілу енергії в електромеханічній ударній системі пресового обладнання легкої промисловості

Для ударних процесів легкої промисловості однією з ключових вимог є можливість регулювання сили удару. Дозоване накопичення енергії в ємнісному накопичувачі дозволяє точно змінювати величину ударної дії та багаторазово її відтворювати. Регулювання здійснюється або шляхом підбору ємності конденсаторів, або регулюванням напруги їх заряду через ПЕ. Використання НЕ зменшує вплив імпульсних струмів на мережу та забезпечує режим форсованого акумулювання [36].

При подачі сигналу керування накопичена енергія передається у електромеханічний перетворювач (ЕМП), який складається з активних опорів, індуктив-

ностей та електромагнітної системи. ЕМП виконує основну функцію — перетворення електричної енергії в механічну та формування параметрів руху робочого органу: сили, швидкості та кінематичного профілю, необхідних для виконання ударних технологічних операцій [36].

У більшості конструкцій якір ЛЕМД одночасно є робочим органом або ударником, який передає механічну енергію робочому інструменту (РІ) та технологічному об'єкту (ТО). Під час операцій пробивання, закріплення металевої фурнітури, тиснення чи маркування РІ встановлюється безпосередньо на ударнику.

Коректна робота СЕМУС можлива лише за умови взаємного узгодження всіх її елементів. Структура системи визначається послідовним перетворенням потоків енергії від електричної мережі до технологічного процесу. Теоретична модель такої системи відображає взаємопов'язану множину елементів з власними функціональними та інформаційними зв'язками, об'єднаних системою керування.

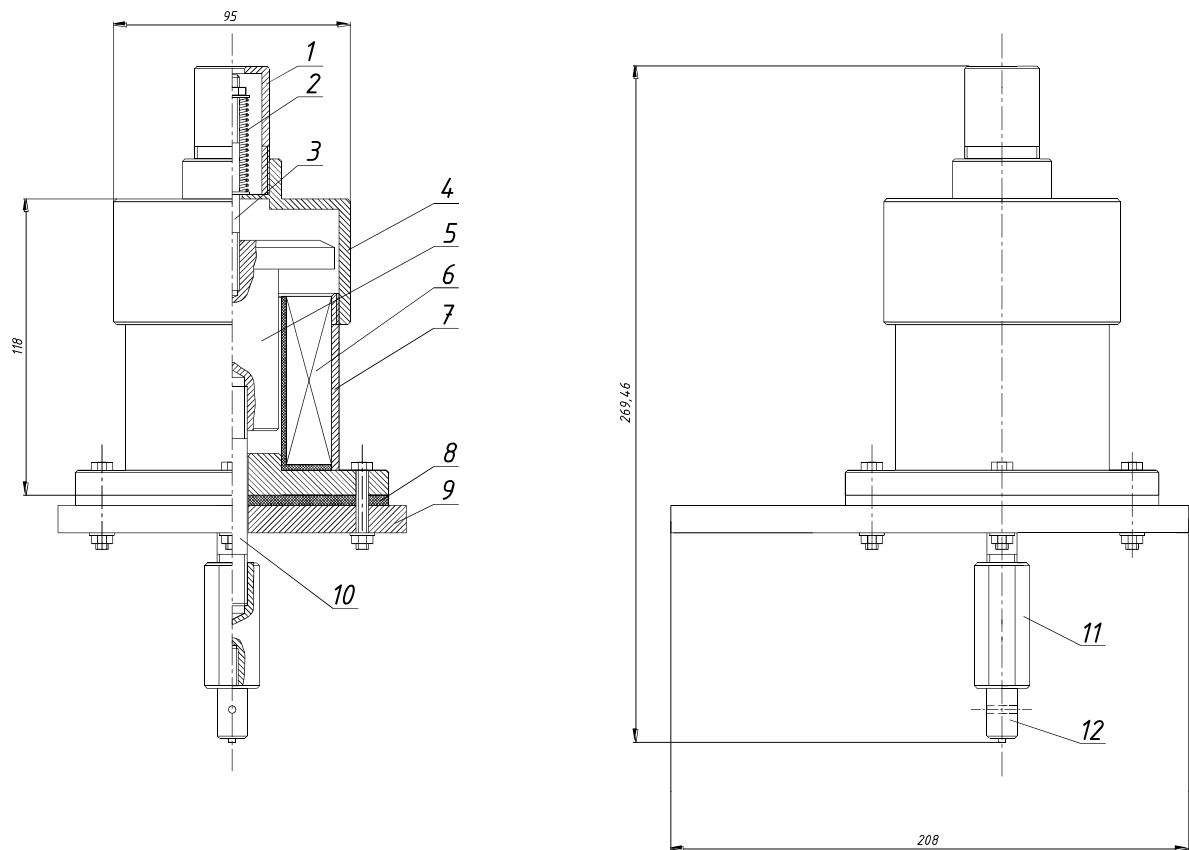
Проектування силових електромеханічних ударних комплексів вимагає інтегрованого підходу: одночасної розробки ЛЕД, ємнісного накопичувача, схеми живлення та керування. За умови можливого серійного виробництва електромеханічних пресових машин особливо важливим є створення енергоефективних, компактних і надійних джерел живлення з ємнісними акумуляторами.

При аналізі схем живлення необхідно враховувати процеси у трьох контурах: вхідному (первинному), вихідному з накопичувачем та розрядному з формуючими елементами. Перші два контури утворюють єдину систему з перетворювачем, тому їх слід розглядати комплексно, тоді як розрядний контур аналізується окремо [36].

Завершальним етапом є вибір оптимального типу магнітної системи ЛЕД. Для технологічних операцій легкої промисловості можливе використання двох режимів - ударного та квазістатичного. Для кожного з них необхідно визначати відповідний тип магнітної системи та раціональний режим роботи, забезпечуючи ефективність та стабільність пресового обладнання.

2.2 Конструкція лінійного електромагнітного двигуна

Для забезпечення приводу робочого інструменту пресового обладнання, зокрема пробійника для перфорації деталей верху взуття, була розроблена спеціалізована конструкція лінійного електромагнітного двигуна (ЛЕМД). Даний привід є центральним силовим елементом ударної системи, відповідальним за формування короткочасного, але енергоємного імпульсу механічної дії (рис.2.2). Конструкція ЛЕМД інтегрується в робочий портал пристрою, який встановлюється на станині, що гарантує жорсткість кріплення, точність базування та відсутність паразитних зміщень під час роботи.



1 - кришка пружини; 2 - пружина; 3 - стержень верхній; 4 - кришка; 5 - якір;
6 – котушка ЛЕМД; 7 - корпус; 8 - прокладка; 9 - плита верхня; 10 - стержень нижній; 11 - перехідник; 12 - пробійник

Рисунок 2.2 - Лінійний електромагнітний двигун:

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк. 41
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Конструктивно ЛЕМД складається з рухомої та нерухомої частин, які формують електромеханічний контур перетворення енергії. Нерухома частина двигуна містить корпус 7, у якому зафіксована котушка 6 - основний елемент, що генерує електромагнітне поле під час подачі імпульсу напруги. Котушка виготовлена з мідного проводу відповідного перерізу, який забезпечує мінімальний активний опір та здатність витримувати імпульсні струми великої величини. Корпус оснащено прокладкою 8, яка виконує одночасно теплоізоляційну, амортизуючу та монтажну функції, запобігаючи перегріванню та вібраційним впливам.

Рухома частина двигуна складається з якоря 5, який з'єднаний із пробійником 12 через систему спрямовуючих елементів: верхній стержень 3, перехідник 11 і нижній стержень 10. Така кінематична схема забезпечує точність руху робочого органу та рівномірність передавання ударного навантаження. Якір розміщується усередині корпусу з невеликим робочим зазором, що забезпечує мінімальні втрати на тертя та стійкість напрямного руху. Пружина 2, розташована між кришкою пружини 1 та верхньою плитою 9, забезпечує повернення якоря у вихідний стан після завершення ударної фази.

Принцип роботи ЛЕМД базується на імпульсному електромагнітному збудженні. У момент подачі електричного імпульсу від блоку живлення та керування на котушку 6 виникає електромагнітне поле, яке створює зусилля втягування якоря 5 всередину корпусу. Якір рухається з високим прискоренням, стискаючи пружину 2 та накопичуючи частину енергії у вигляді пружної деформації. Закріплений на якорі пробійник 12 під час свого переміщення взаємодіє з матеріалом заготовки, і у момент контакту здійснюється процес пробивання. Завдяки точній орієнтації елементів удар відбувається строго по нормалі до поверхні, що гарантує якість отвору.

Після припинення подачі імпульсу електромагнітне поле у котушці 6 швидко зменшується, внаслідок чого електромагнітна сила припиняє дію. На цьому етапі відпрацьовує пружина 2, яка вивільняє накопичену енергію і повертає якір з

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

пробійником у верхнє положення. Така комбінація електромагнітного прискорення та пружного повернення забезпечує циклічність, високу частоту повторення ударів і мінімальне навантаження на конструктивні елементи.

Конструкція ЛЕМД розроблена з урахуванням необхідності витримування значних динамічних навантажень, що виникають у процесі перфорації. Корпус 7 виготовляється з матеріалу з високою механічною міцністю та добрими магнітними властивостями, а кришки 1 і 4 запобігають проникненню пилу та деформуванню вузла. Внутрішні поверхні оброблені таким чином, щоб забезпечити мінімальний коефіцієнт тертя рухомої частини. Перехідник 11 виконує роль адаптера між якорем та пробійником, дозволяючи швидко змінювати інструмент відповідно до технологічних вимог.

Розроблена конструкція забезпечує високу точність і повторюваність удару, що є критично важливим при виконанні дрібних перфораційних операцій у взуттєвому виробництві. Висока швидкість ЛЕМД, керованість імпульсу та стабільність механічних характеристик у поєднанні з простотою обслуговування роблять його перспективним для інтеграції у різні типи пресового та технологічного обладнання легкої промисловості.

2.3 Загальний вигляд розробленої конструкції ЛЕМД

Після проведення повного комплексу конструкторських і перевірочних розрахунків, що включали визначення розмірних параметрів, вибір матеріалів, розрахунок електромагнітних і механічних характеристик лінійного електромагнітного двигуна (ЛЕМД), була виготовлена його дослідно-промислова конструкція (рис.2.3). Усі основні елементи ЛЕМД - корпус, якорь, кришки, спрямовуючі стержні, перехідні елементи та опорні плити - виготовлено зі сталі 45, що має достатню міцність, пружність і стійкість до ударних навантажень, які виникають під час роботи двигуна. Вибір цього матеріалу забезпечив необхідний запас міцності

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк. 43
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

як для магнітопроводу, так і для конструктивних частин, що сприймають циклічні механічні навантаження.



Рисунок 2.3 – Фотоілюстрація розробленого електромагнітного двигуна

Готова конструкція ЛЕМД характеризується компактністю, високою жорсткістю та точністю взаємного розташування елементів. Рухома частина двигуна має мінімальний робочий зазор із корпусом, що дозволяє знизити втрати на тертя та забезпечує плавність ходу якоря. Конфігурація корпусу передбачає розміщення котушки в оптимальному положенні відносно траєкторії руху якоря, що підвищує ефективність перетворення електромагнітної енергії в кінетичну. Конструкція спрямовуючих елементів розроблена таким чином, щоб забезпечити точність позиціонування пробійника та високу повторюваність ударної дії в умовах багаточислової роботи.

Виготовлена модель ЛЕМД підтвердила відповідність основним вимогам, визначеним на етапах проєктування: забезпечення необхідного прискорення рухомої частини, стабільності ударного імпульсу, швидкого повернення якоря у вихідне положення та високої надійності при тривалій експлуатації. Застосування сталі 45 гарантувало необхідний ресурс роботи, стійкість конструкції до деформацій та збереження геометричної точності при повторних навантаженнях. Отриманий зразок ЛЕМД став основою для проведення подальших експериментальних досліджень, випробувань у складі пресового обладнання та підтвердження працездатності обраних технічних рішень.

2.4 Схема живлення і керування силовою електромеханічною ударною системою в пресовому обладнанні легкої промисловості

2.4.1 Загальні відомості

Вибір силової схеми перетворювача та відповідного алгоритму керування є одним із ключових етапів при створенні електромеханічного пресового обладнання для легкої промисловості. Підґрунтям для такого вибору виступають технічні й економічні вимоги до обладнання, зокрема показники якості електроенергії та енергоощадності під час експлуатації. На стадії виготовлення дослідного зразка було раціонально підібрано активні матеріали й компоненти, які визначають рівень енерговитрат системи [36].

На відміну від традиційних споживачів, силові електромеханічні ударні системи, що живляться від ємнісних накопичувачів енергії (ЄНЕ), акумулюють енергію з мережі та використовують її лише під час виконання технологічної операції. Для роботи такого пресового обладнання необхідно мати схему живлення, яка забезпечує перетворення енергії джерела, передачу її в ЄНЕ та подальший розряд на обмотку збудження лінійного електричного двигуна за командою керування.

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

Оскільки технологічні операції легкої промисловості потребують точного дозування енергії удару, у складі силової частини обов'язково передбачають схему регулювання енергії заряду.

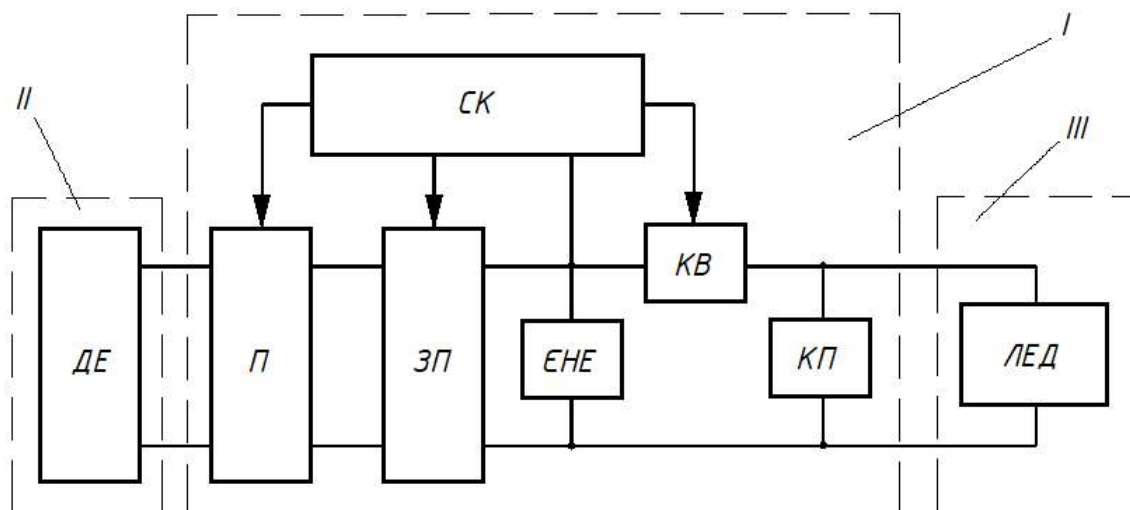
У системах із ЄНЕ накопичена енергія WWW визначається ємністю $C_{\text{є.н.є}}$ та напругою $U_{\text{є.н.є}}$. Максимальна реалізація потенціалу такого блоку можлива лише за узгодження процесу розряду конденсаторної батареї з динамікою лінійного електричного двигуна. Режим вважається узгодженим, якщо значення W , $C_{\text{є.н.є}}$ та $U_{\text{є.н.є}}$ забезпечують повний розряд ЄНЕ з моменту спрацювання до зупинки якоря, формуючи максимальні енергетичні показники ударної системи [38].

Схеми живлення та керування лінійних електричних двигунів повинні забезпечувати регулювання та стабілізацію напруги заряду ЄНЕ, мати мінімальні масогабаритні показники, просту структуру та низьку собівартість. Літературні джерела містять значну кількість досліджень щодо використання ємнісних накопичувачів та різноманітних схем їх живлення [39]. Проте практичні рішення, адаптовані саме для ударних операцій легкої промисловості, зустрічаються рідко, що підкреслює актуальність створення спеціалізованих схем живлення та керування для пресового обладнання цього типу.

2.4.2 Структурна схема пристрою живлення та керування силовою електромеханічною ударною системою в пресовому обладнанні легкої промисловості

З метою створення високоефективних пристроїв живлення та керування силовими електромеханічними ударними системами пресового обладнання для виконання технологічних операцій легкої промисловості була розроблена структурна схема імпульсного джерела струму з ємнісним накопичувачем енергії (І). Вона представлена на рис. 2.4 [40] і виступає основою для побудови енергетичної частини комплексу, що забезпечує формування, накопичення та швидке вивільнення електричної енергії для ЛЕД у складі силової ударної системи. Під час роз-

роблення схеми враховувалася необхідність інтеграції електроживлення (II) та навантажувального електромеханічного приводу у вигляді лінійного електричного двигуна (III), що дало змогу узгодити процеси перетворення та передачі енергії у всьому технологічному циклі.



СК – система керування; ДЕ – джерело енергії; ЗП – зарядний пристрій; ЄНЕ – ємнісний накопичувач енергії; КВ – керований вентиль (тиристор);

П – перетворювач; КП – контур погашення магнітного поля

Рисунок 2.4 - Структурна схема пристрою живлення та управління силовою електромеханічною ударною системою:

До складу імпульсного джерела струму входять перетворювач, зарядний пристрій, ємнісний накопичувач енергії, контур погашення магнітного поля та система керування, які утворюють функціонально завершений комплекс силової електроніки. Перетворювач здійснює перетворення параметрів електроенергії, що надходить від джерела, та забезпечує комутацію зарядного пристрою. Зарядний пристрій, у свою чергу, формує напругу заряду ємнісного накопичувача енергії, а його ввімкнення та вимкнення виконуються за допомогою комутуючих елементів, розташованих у перетворювачі. Система керування виконує комплекс функцій, серед яких керування роботою зарядного пристрою, контроль величини заряду

ЄНЕ та формування управляючого імпульсу для тиристорного вентиля, що ініціює процес розряду на ЛЕД.

Ємнісний накопичувач енергії відіграє ключову роль у формуванні ударного імпульсу. У процесі заряду він накопичує енергію, визначену ємністю $C_{\text{є.н.є.}}$ та напругою $U_{\text{є.н.є.}}$, після чого у момент запуску повністю передає її в розрядний контур. Ефективність роботи ЄНЕ залежить від узгодження процесу розряду з динамікою лінійного електричного двигуна, оскільки лише при правильному співвідношенні зарядних параметрів і характеристик ЛЕД забезпечується повне формування ударного імпульсу від початку спрацьовування до зупинки якоря. Такий режим називають узгодженим, і він забезпечує максимальні вихідні показники силової електромеханічної ударної системи [42].

Розрядний контур побудований із ємнісного накопичувача енергії та елементів із параметрами, що змінюються в часі, - активного опору R_a та індуктивності L_k лінійного електричного двигуна. Після подачі команди з системи керування керований вентиль відкривається, і накопичена енергія миттєво передається в обмотки ЛЕД. При цьому контур погашення магнітного поля забезпечує швидке зниження залишкової енергії та запобігає виникненню небажаних електромагнітних процесів, які можуть порушити повторюваність ударних імпульсів. Завдяки цьому досягається стабільність режимів роботи та повна керованість кожного циклу ударної дії.

Система керування об'єднує всі елементи силової частини в єдину функціональну структуру, забезпечуючи синхронізацію процесів заряду, накопичення, розряду та гасіння імпульсу. Вона визначає часову логіку роботи всіх вузлів, керує параметрами заряду, контролює готовність ЄНЕ до запуску та формує командні сигнали, необхідні для роботи керованого вентиля. Таким чином, СК забезпечує точність відтворення ударних імпульсів, їх стабільність і узгодженість з технологічним процесом.

Розроблена структурна схема імпульсного джерела струму з ЄНЕ є основою для побудови енергетичного модуля пресового обладнання з ударною дією.

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

Завдяки такому підходу система здатна забезпечувати високоточне дозування енергії, оперативне формування імпульсів, стійку роботу за змінних навантажень та ефективне управління лінійним електричним двигуном у складі силової електромеханічної ударної системи. Схема вирізняється функціональною завершеністю, широкими можливостями регулювання та високою технологічною надійністю, що робить її придатною для застосування в автоматизованому пресовому обладнанні легкої промисловості.

2.4.3 Блоки живлення та керування силовою електромеханічною ударною системою в пресовому обладнанні

На основі структурної схеми імпульсного джерела струму було розроблено декілька варіантів схем живлення та керування силовими електромеханічними ударними системами пресового обладнання, призначених для виконання технологічних операцій легкої промисловості різної потужності [37–42]. Основне завдання таких схем полягає у формуванні, накопиченні та швидкому вивільненні електричної енергії для живлення лінійного електричного двигуна (ЛЕД), а також у забезпеченні точного регулювання параметрів ударного імпульсу відповідно до вимог технологічного процесу.

Одним із базових рішень є блок живлення з механічним керуванням ємнісним накопичувачем енергії (ЄНЕ). У такій системі блок живлення виконується як окремий модуль, який дозволяє дискретно змінювати величину енергії, що подається до індуктивності ЛЕД. Регулювання реалізується шляхом вибору ємності конденсаторної батареї та встановлення напруги її зарядки. Це забезпечує можливість змінювати розрядний струм і тривалість імпульсу, що подається в обмотку ЛЕД, а також забезпечувати ефективне погашення магнітного поля наприкінці енергетичного циклу.

Блок передбачає використання автотрансформатора для виставлення напруги зарядки, перемикачів для підключення необхідної кількості конденсаторів,

елемента регулювання тривалості зарядки та окремого розрядного положення для подачі накопиченої енергії на ЛЕД. Під час розряду енергія електричного поля ЄНЕ перетворюється в магнітну енергію індуктивності й частково розсіюється у резистивних елементах, забезпечуючи створення ударного імпульсу необхідної сили.

Для підвищення надійності, усунення недоліків механічних комутаційних вузлів та зменшення втрат електроенергії було створено блок живлення з безконтактним комутаційним вузлом на основі силового тиристора. Такий блок складається з трьох основних частин: випрямляча, зарядного контуру та розрядного контуру. Зарядний контур містить батарею конденсаторів, обмежувальний резистор для регулювання величини струму, діод для запобігання зворотним струмам та резистор для зняття надлишкового заряду. Розрядний контур включає батарею конденсаторів, індуктивність ЛЕД та тиристор, який виконує функцію швидкого й безконтактного перемикачання.

Принцип дії блоку полягає у зарядці конденсаторної батареї до робочої напруги, після чого зарядний контур відключається, а тиристор відкривається під дією керуючого імпульсу. У цей момент відбувається миттєва передача накопиченої енергії на обмотку ЛЕД, що забезпечує формування потужного ударного імпульсу. Надлишкова електрорушійна сила самоіндукції компенсується додатковим колом прискореного розряду, що забезпечує швидке згасання магнітного поля та підвищує точність повторюваності імпульсів. Недоліком такого рішення є необхідність ручного контролю величини заряду конденсаторів за вольтметром.

Для підвищення точності дозування енергії та автоматизації процесів зарядки й розрядження було розроблено блок живлення з мікроконтролерним керуванням. До його складу входять випрямляч, зарядний контур, розрядний контур та мікроконтролер. Мікроконтролер забезпечує повний контроль рівня заряду ЄНЕ, дає змогу дисплеєм відображати його у відсотках від максимального значення, автоматично встановлює задану робочу напругу й гарантує стабільність енергоподавання до ЛЕД. Такий підхід значно підвищує точність формування

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

ударних імпульсів, зменшує залежність від оператора та дозволяє адаптувати систему під різні режими роботи.

Розроблені блоки живлення та керування силовими електромеханічними ударними системами можуть застосовуватися в пресовому обладнанні різної потужності, що працює в ударному або імпульсному режимах. Вони забезпечують широкий діапазон регулювання енергії удару, стабільність робочих параметрів, високу повторюваність імпульсів та можливість тонкого налаштування технологічних режимів відповідно до властивостей оброблюваних матеріалів. Такі блоки також можуть використовуватися у лабораторних стендах для експериментальних досліджень та оптимізації режимів роботи лінійних електричних двигунів у силових ударних системах.

2.5 Установа з двохкоординатною системою переміщення та мікроконтролерною системою керування

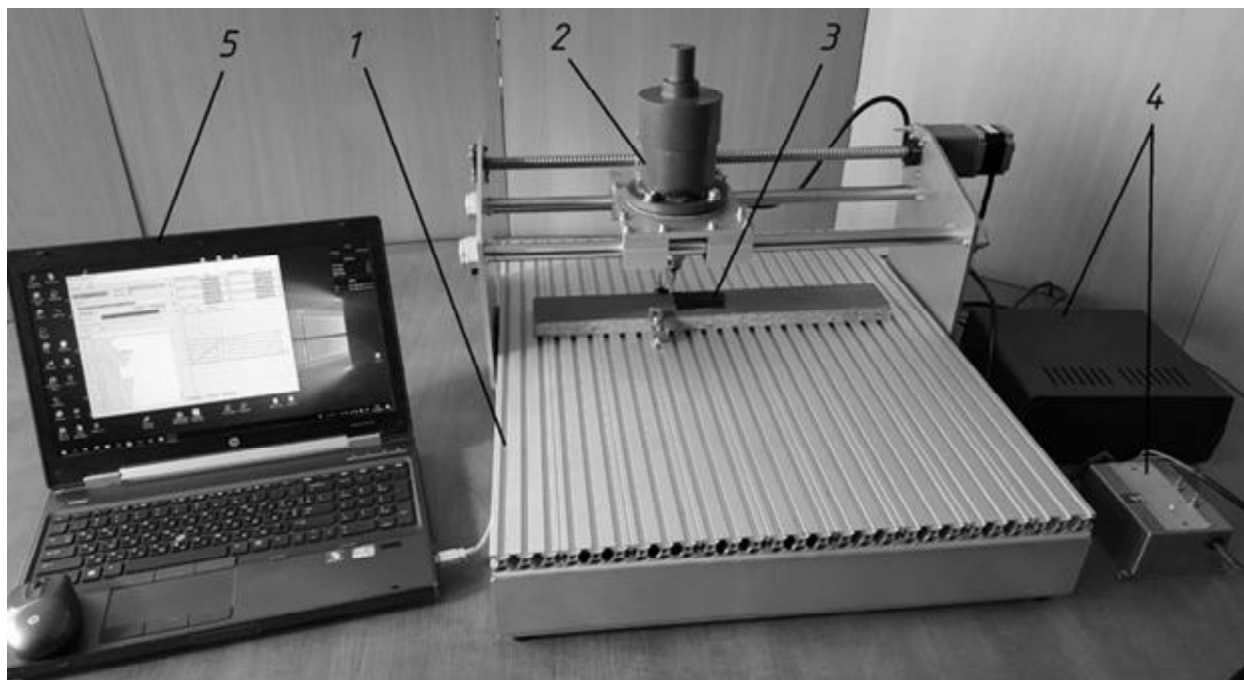
На основі створеного лінійного електромагнітного двигуна була розроблена високоточна установка з двохкоординатною системою переміщення, призначена для автоматизованого виконання виробничих операцій у галузі легкої промисловості (рис.2.4).

Конструкція обладнання розроблена таким чином, щоб забезпечити універсальність його використання: залежно від характеру технологічної операції передбачена можливість встановлення різних типів ЛЕД, які відрізняються силовими та кінематичними параметрами, типом робочого інструменту та енергетичною характеристикою імпульсу. Це робить установку придатною як для перфорації, так і для маркування, клеймування та виконання інших ударних операцій.

Основу механічної частини становить двохкоординатна система переміщення (X–Y), виконана на базі напрямних лінійного ковзання та крокових двигунів з високою роздільною здатністю. Така конструкція забезпечує плавність руху,

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

повторюваність позиціювання та мінімальні похибки навіть при складних траєкторіях. На рухомій платформі закріплено ЛЕД, робоча частина якого (пробійник або інший інструмент) виконує імпульсне переміщення по осі Z для реалізації ударної дії. Платформа має достатню жорсткість для забезпечення відсутності деформацій під час удару, що є критично важливим для точності формування отворів у взуттєвих деталях.



1 – двохкоординатна система переміщення; 2 – ЛЕД; 3 – деталь взуття; 4 – пристрій живлення та керування ЛЕД; 5 – комп'ютер

Рисунок 2.5 - Установка для перфорування деталей верху взуття:

Технічна архітектура установки включає кілька взаємопов'язаних модулів: механічну систему координатного переміщення, електромагнітний виконавчий привід ЛЕД, систему керування кроковими двигунами, блок живлення драйверів, цифровий модуль керування ЛЕД та мікроконтролерну систему верхнього рівня. Всі ці компоненти об'єднані єдиною програмною логікою, що дозволяє координувати переміщення платформи, задавати параметри ударного імпульсу, коригувати траєкторію руху та контролювати стан всіх вузлів у реальному часі.

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

Принцип роботи установки складається з кількох етапів. На початковому етапі оператор розміщує заготовку на робочому столі та, за необхідності, закріплює її. Далі за допомогою спеціально розробленого програмного забезпечення формується графічна модель майбутнього рисунка перфорації або маркування. Програма автоматично генерує набір координат і послідовність команд для двохкоординатної системи переміщення та ЛЕД, відповідно до яких машина виконує операцію. Після запуску процесу крокові двигуни задають плавний рух платформи у площині X–Y, позиціонуючи робочий орган над відповідною точкою. Лінійний електромагнітний двигун у визначений програмою момент отримує імпульс живлення та здійснює ударне переміщення пробійника по осі Z, пробиваючи матеріал.

Перевагою ЛЕД у складі такої системи є його здатність формувати керований імпульс з високою швидкістю та енергією, що дозволяє пробивати матеріали різної товщини та структури - від натуральної шкіри до синтетичних композитів. Завдяки імпульсному принципу роботи ЛЕД потребує живлення лише в моменти виконання ударів, що значно знижує загальне енергоспоживання установки.

Мікроконтролерна система керування забезпечує високу точність синхронізації між координатним переміщенням та ударною дією. Вона виконує такі функції: аналіз траєкторії, керування кроковими двигунами, регулювання рівня заряду ємнісного накопичувача енергії ЛЕД, видача тригерних імпульсів на блок керування двигуном, моніторинг стану вузлів, обробка аварійних ситуацій та передача даних оператору. Наявність зворотного зв'язку забезпечує можливість контролю енергетичного рівня удару, стабільності повторення імпульсів і адаптації до змін технологічних параметрів.

Універсальність установки суттєво розширюється завдяки можливості заміни пробійника на інший робочий інструмент. Наприклад, встановивши голку та сформувавши іншу програму, можна виконувати маркування деталей, нанесення елементів декору або формування швейних отворів. Це дозволяє використовувати машину на різних виробничих ділянках, підвищуючи гнучкість виробництва та зменшуючи потребу в окремих однофункціональних пристроях.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		53

Таким чином, розроблена установка з двохкоординатною системою переміщення та мікроконтролерною системою керування є ефективним інструментом для виконання складних автоматизованих операцій у легкій промисловості. Вона поєднує високу точність, повторюваність, енергоефективність та адаптивність, що дозволяє розглядати її як перспективну платформу для впровадження в сучасні виробничі комплекси взуттєвої та галантерейної галузей.

2.6 Розробка експериментальної установки для дослідження технологічних режимів пресового обладнання з ЛЕМД

Для дослідження технологічних режимів пресового обладнання, оснащеного лінійним електромагнітним двигуном (ЛЕМД), була створена спеціалізована експериментальна установка, призначена для аналізу процесів імпульсного електромеханічного енергоперетворення та оцінювання якості виконання операції перфорування деталей із матеріалів легкої промисловості. Загальний вигляд розробленої установки наведено на рис. 2.6 [43-45]. Її створення стало необхідним для отримання достовірних експериментальних даних, які дозволяють встановити закономірності впливу електричних, кінематичних та силових параметрів ЛЕМД на формування отворів, точність виконання операції та енергоефективність ударного процесу.

Експериментальна установка складається з трьох основних функціональних блоків:

- пресового обладнання з ЛЕМД;
- пристрою живлення та керування;
- вимірювально-діагностичного модуля.

Кожен із блоків виконує окрему роль у процесі дослідження, а їх незалежне й взаємопов'язане функціонування забезпечує можливість всебічного аналізу поведінки ЛЕМД у режимах ударної дії.

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

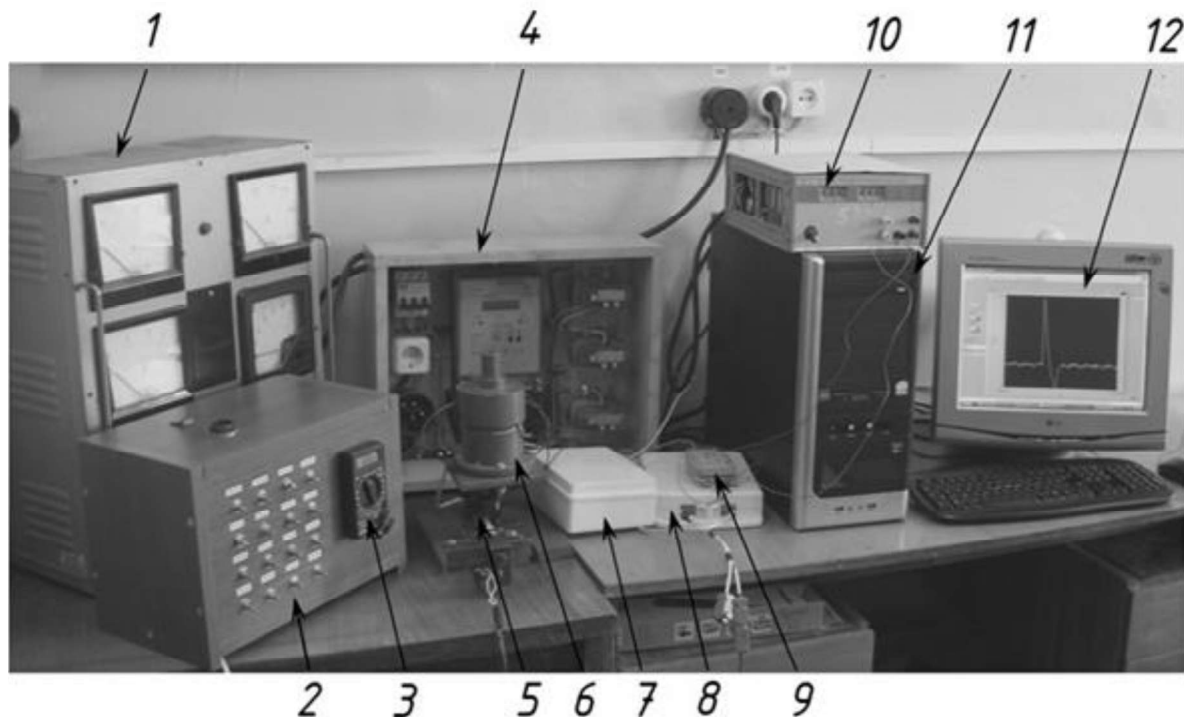
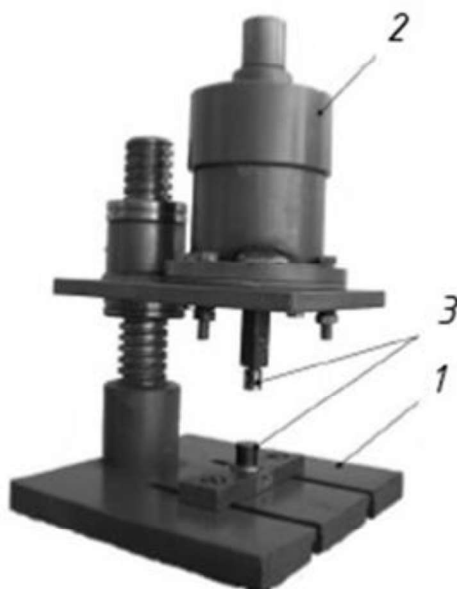


Рисунок 2.6 – Експериментальна установка для дослідження технологічних режимів пресового обладнання з ЛЕМД

До вимірювально-енергетичної частини установки входять такі елементи: лабораторний автотрансформатор ЛАТР 1, який дає можливість плавно регулювати напругу живлення; блок живлення 2, що забезпечує заряд ємнісного накопичувача енергії; електронний мультиметр 3, призначений для контролю напруги й струму; трифазний лічильник електричної енергії ЕЛВІН 4, який використовується для реєстрації фактичних витрат електроенергії при різних режимах роботи ЛЕМД; резисторний датчик переміщення 5, що забезпечує вимірювання ходу робочого органу з високою точністю. Для реєстрації параметрів струму та напруги застосовується спеціальний пристрій 7, який об'єднує дільник напруги та датчик струму. Дані з усіх сенсорів надходять у блок узгодження сигналів NI SCC-68 8, де здійснюється адаптація рівнів сигналів до вимог плати збору даних. Блок гальванічної розв'язки 9 виконує захист низьковольтних кіл від імпульсних перенапруг. Живлення допоміжних кіл забезпечується джерелом живлення 10, а обробка

первинних даних виконується комп'ютером 11 із встановленою платою збору даних та віртуальним приладом, реалізованим у програмному середовищі LabVIEW 8.5.

Виконавчий модуль установки складається з преса з ЛЕМД δ -типу, конструкцію якого було апробовано в системі з двохкоординатним переміщенням (див. рис. 2.2, рис. 2.3). Загальну конструкцію преса подано на рис. 2.7, де показані: станина 1, на якій жорстко закріплено лінійний електромагнітний двигун 2, та робочі інструменти у складі пуансона і матриці 3. Така конструкція дозволяє забезпечити значні ударні зусилля, необхідні для пробивання отворів у шкірі, текстильних матеріалах та полімерних заготовках, а також забезпечує достатню жорсткість та стабільність геометрії робочого простору.



1 – станина; 2 – ЛЕМД; 3 – пуансон і матриця

Рисунок 4.2 – Електромагнітний прес для виконання операцій легкої промисловості:

Для формування імпульсу енергії використовується блок живлення з ємнісним накопичувачем енергії та безконтактним тиристорним комутаційним пристроєм. Такий блок забезпечує можливість точного дозування енергії удару шляхом зміни напруги зарядки та ємності накопичувача, а також дозволяє отримувати

імпульси високої стабільності та повторюваності. Це є ключовим фактором при дослідженні впливу режимів роботи ЛЕМД на якість перфорації.

Розроблена експериментальна установка надає широкі можливості для вимірювання та аналізу різних параметрів: швидкості руху якоря, часу удару, енергії імпульсу, спожитої електричної енергії, величини струму розряду, а також характеру навантаження при проходженні матеріалу. Застосування сучасної вимірювальної апаратури й віртуальних засобів контролю дозволяє отримувати дані з високою точністю, а також проводити спектральний, часовий та амплітудний аналіз імпульсних процесів.

Установка створює основу для оптимізації технологічних режимів роботи ЛЕМД при перфоруванні матеріалів: визначення оптимальної енергії удару, частоти повторення імпульсів, рівня напруги зарядки, тривалості імпульсів та умов навантаження. Вона дозволяє досліджувати не лише енергетичну ефективність ЛЕМД, а й вплив цих параметрів на геометрію та якість отворів, знос робочих інструментів та стабільність процесу у серійному режимі.

Таким чином, розроблена експериментальна установка є комплексним дослідницьким інструментом, що забезпечує можливість всебічного аналізу роботи ЛЕМД у складі пресового обладнання. Вона дозволяє формувати теоретично обґрунтовані рекомендації щодо оптимізації режимів перфорування та подальшої модернізації силових електромеханічних ударних систем для операцій легкої промисловості.

2.7 Висновки до другого розділу

У другому розділі виконано комплексне опрацювання питань, пов'язаних із створенням силової електромеханічної ударної системи на базі лінійного електромагнітного двигуна для пресового обладнання легкої промисловості, а також розроблено необхідні технічні засоби для подальших експериментальних досліджень технологічних режимів перфорування.

Наведено узагальнену структурну схему СЕМУС, у якій виділено технологічну частину та енергетичний канал. Показано, що узгоджена робота елементів електричної мережі, перетворювача енергії, ємнісного та магнітного накопичувачів, електромеханічного перетворювача та робочого органу є визначальною умовою забезпечення стабільних ударних режимів і можливості регулювання енергії удару відповідно до вимог технологічного процесу.

Запропонований лінійний електромагнітний двигун адаптовано для приводу пробійника при перфорації деталей верху взуття. Дослідний зразок ЛЕМД забезпечує працездатність прийнятих технічних рішень, забезпечивши необхідну енергію, швидкодію та повторюваність ударних імпульсів.

Наведено структурну схему пристрою живлення та керування силовою електромеханічною ударною системою. Показано доцільність використання ємнісного накопичувача енергії в поєднанні з перетворювачем, зарядним пристроєм, керованим вентилем і контуром погашення магнітного поля. Сформульовано вимоги до узгодженого режиму «заряд–розряд» ЄНЕ, за якого забезпечується повна реалізація енергетичного потенціалу ЛЕМД у межах одного ударного циклу.

Розроблено та описано кілька варіантів блоків живлення і керування: із механічною комутацією, з безконтактним тиристорним комутаційним апаратом та з мікроконтролерним керуванням процесами зарядки й розряду ємнісного накопичувача. Показано, що застосування безконтактної комутації та мікроконтролера підвищує точність дозування енергії удару, зменшує втрати, підвищує надійність та створює передумови для автоматизації налаштування технологічних режимів.

Наведена установка з двохкоординатною системою переміщення та мікроконтролерною системою керування забезпечує автоматизоване переміщення деталі та/або робочого органу, програмне формування контуру перфорації та синхронізацію руху з імпульсною роботою ЛЕД. Показано, що така система розширює функціональні можливості обладнання, дозволяє реалізувати різні схеми перфорації, маркування та клеймування і є придатною для інтеграції в сучасні автоматизовані комплекси легкої промисловості.

Розроблена експериментальна установка для дослідження технологічних режимів пресового обладнання з ЛЕМД, що включає пресовий модуль, блок живлення та керування і вимірювально-діагностичний комплекс із використанням плати збору даних та програмного середовища LabVIEW, забезпечує можливість всебічного аналізу електричних, кінематичних та силових параметрів ударної дії. Її структура й склад дозволяють отримувати достовірні експериментальні дані для подальшого обґрунтування та оптимізації режимів перфорування.

Таким чином, у другому розділі сформовано повну технічну базу для проведення експериментальних досліджень: від структурного та конструктивного опрацювання силової електромеханічної системи й ЛЕМД до створення схем живлення, керування та спеціалізованої експериментальної установки, що забезпечує реалізацію поставленої задачі дослідження технологічних режимів пресового обладнання з ЛЕМД при виконанні операції перфорування.

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

3 ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ ОБЛАДНАННЯ З ЛЕМД ДЛЯ ВИКОНАННЯ ОПЕРАЦІЇ ПЕРФОРУВАННЯ

3.1 Мета проведення досліджень робочих процесів пристрою з ЛЕМД для виконання операції перфорування

Метою проведення досліджень робочих процесів пресового пристрою з лінійним електромагнітним двигуном (ЛЕМД) під час виконання операції перфорування є визначення оптимальних технологічних режимів, які забезпечують максимальну ефективність ударної дії, стабільність параметрів процесу та високу якість формування отворів у матеріалах різної жорсткості та структури. Перфорування, як технологічна операція руйнування, пред'являє високі вимоги до точності дозування енергії удару, повторюваності руху ударника та здатності обладнання працювати у короткочасних динамічних режимах без втрати продуктивності. ЛЕМД, завдяки імпульсному характеру роботи, дає можливість точно керувати енергетичними параметрами процесу та адаптувати ударну дію до властивостей конкретного матеріалу.

Дослідження спрямовані на встановлення закономірностей взаємодії ударника з матеріалом, визначення параметрів, що формують якість перфорування, та оцінку енергетичної ефективності роботи ЛЕМД. До таких параметрів належать енергія удару, швидкість та прискорення ударника, частота повторення імпульсів, а також коефіцієнт корисної дії η , який визначає ступінь перетворення електричної енергії в механічну роботу. Важливим завданням є виявлення впливу факторів керування - таких як тривалість і амплітуда імпульсу живлення, маса рухомої частини, зазор у магнітній системі, параметри направляючих - на кінцевий результат технологічного процесу.

Під час перфорування матеріалу необхідно забезпечити не лише достатню енергію руйнування, але й високу геометричну точність отворів, відсутність розривів, задирок та інших дефектів крайки. Тому дослідження також охоплюють

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

аналіз напружено-деформованого стану інструмента і матеріалу в момент удару, вплив пружних властивостей заготовки, а також стабільність параметрів удару при довготривалій роботі.

Досягнення поставлених цілей можливе за рахунок використання методів планування експерименту, які забезпечують структуроване, кероване та ресурсо-ефективне проведення дослідницької роботи. Застосування багатofакторних планів дозволяє:

- зменшити кількість дослідів при збереженні повноти інформації;
- оцінити вплив кожного фактора на вихідний параметр та визначити найбільш значимі змінні;
- дослідити взаємодії між факторами, що неможливо при одновимірних підходах;
- компенсувати вплив випадкових збурень і нерівномірності властивостей матеріалу;
- побудувати адекватну математичну модель процесу перфорування;
- сформулювати поверхні відгуку та визначити область раціональних режимів;
- отримати оптимальні значення технологічних параметрів для забезпечення максимальної продуктивності та енергоефективності пристрою.

Таким чином, дослідження робочих процесів пристрою з ЛЕМД для перфорування має на меті встановлення об'єктивних закономірностей роботи електромагнітного приводу, підвищення якості виконання технологічних операцій та створення науково обґрунтованої бази для оптимізації режимів роботи пресового обладнання. Використання методів планування експерименту є ключовим інструментом, що дозволяє отримати статистично достовірні, порівняльні та відтворювані результати при мінімальних витратах ресурсів.

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

3.2 Проведення експериментальних досліджень на пристрої з лінійним електромагнітним двигуном

Планування експерименту є невід'ємним елементом наукового дослідження, оскільки саме на цьому етапі визначаються раціональна кількість дослідів, умови їх проведення та методи подальшої обробки отриманих даних. Основний зміст такого планування полягає у формуванні мінімального, але достатнього набору експериментальних точок, який забезпечує можливість віднайти оптимальні режими роботи досліджуваної системи з необхідною точністю. Вибір структури експерименту, способів статистичної інтерпретації результатів та процедур прийняття рішень дозволяє уникнути надмірного числа дослідів і водночас отримати повноцінну модель процесу, що підтверджується у працях [32–35]. Завдяки плануванню суттєво скорочується обсяг експериментальних операцій, а отримані дані стають більш впорядкованими та придатними для формування математичної залежності між факторами й вихідними параметрами.

У межах даної роботи використано некомпозиційний план другого порядку, який сформовано як вибірку з плану типу 3^k . Для вирішення поставленого завдання було прийнято кількість факторів $k=3$, число рівнів варіювання $p=3$, загальну кількість точок плану $N=15$, а повторюваність дослідів забезпечено величиною $n=3$. Такий план дає змогу встановити як основний вплив факторів, так і їх можливі взаємодії, що особливо актуально для систем з ЛЕМД, у яких параметри процесу визначаються складними електромеханічними залежностями.

Обрані фактори x_1, x_2, \dots, x_n характеризуються різними одиницями вимірювання та значно відрізняються за порядками величин. Подібна неоднорідність ускладнює їх пряме використання у математичній моделі, призводячи до труднощів при обчисленні коефіцієнтів та нормуванні. Тому перед побудовою регресійних залежностей було виконано кодування факторів. Цей прийом дозволив привести всі вхідні параметри до єдиного масштабованого інтервалу, спростити по-

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

дання умов експерименту та зробити результати більш стійкими до впливу випадкових похибок. Методика переходу від натуральних до кодованих значень здійснювалась відповідно до підходів, викладених у джерелі [46].

Досліджуване пресове обладнання з ЛЕМД являє собою багатофакторну технічну систему, для якої ключовими характеристиками є енергія удару $A_{уд}$, частота формування ударів $n_{ход}$ та коефіцієнт корисної дії η . Ці параметри визначають продуктивність обладнання, ефективність перетворення електричної енергії в механічну роботу та якість виконання процесів руйнування матеріалу. Оскільки ЛЕМД функціонує в імпульсному режимі, електрична енергія споживається лише у фазі створення удару, що забезпечує енергетичну економність і можливість точного керування рівнем механічного впливу. Ударнику передається стільки енергії $A_{уд}$, скільки потрібно для виконання технологічної операції, а режим роботи вважається раціональним тоді, коли перетворення спожитої енергії в корисну роботу відбувається з максимально можливою ефективністю. Такий принциповий підхід забезпечує зниження втрат і підвищення точності процесу перфорування.

Головним завданням планування експерименту в контексті дослідження ЛЕМД є визначення оптимального поєднання досліджуваних факторів у межах їх допустимого варіювання. При цьому критерієм оптимізації виступає максимальне значення енергії удару $A_{уд}$, оскільки саме цей параметр найповніше характеризує здатність обладнання створювати достатню силу для руйнування матеріалу. Сутність задачі полягає у знаходженні такого набору параметрів приводу, за якого енергія ударної дії досягає найбільшого значення без порушення умов раціональної роботи системи. При цьому враховується вплив частоти ударів $n_{ход}$, обмеження з боку коефіцієнта корисної дії η та особливості процесу перетворення енергії, хоча детальний аналітичний зв'язок між $A_{уд}$, η та $W_{ел}$ у даному фрагменті не наводиться.

Таким чином, переформатоване планування експерименту забезпечує системний підхід до вивчення функціональних особливостей ЛЕМД, дозволяє скоротити трудомісткість випробувань, підвищити точність аналізу та створити основу

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

для подальшої оптимізації режимів роботи пресового обладнання при виконанні операцій перфорування й руйнування матеріалів.

Таким чином, енергія удару $A_{y\delta}$ розглядається як основний параметр оптимізації, тоді як частота ударів ударника n та ККД виступають обмеженнями. Це зумовлено тим, що між величинами $A_{y\delta}$ (енергією удару), ККД η та споживаною електричною енергією W_{el} існує взаємозв'язок:

$$\eta = \frac{A_{y\delta}}{W_{el}}. \quad (3.1)$$

Вихідний показник – енергія удару A_y – визначається наступним чином:

$$A_y = \frac{m_{y\delta} \cdot V_{y\delta}^2}{2}, \quad (3.2)$$

де $m_{y\delta}$ – маса ударника, кг;

$V_{y\delta}$ – передударна швидкість ударника, м/с.

Коли пристрій з ЛЕМД живиться від ємнісного накопичувача електроенергії, передударна швидкість ударника $V_{y\delta}$, переважно визначатися напругою зарядження $U_{\epsilon.n.e.}$, ємністю конденсаторної батареї $C_{\epsilon.n.e.}$ та зазором δ між якорем двигуна і стопом (тобто величиною ходу ударника). Це справедливо за умови, що жорсткість зворотного елемента z та масогабаритні параметри конструкції x залишаються незмінними. Таким чином, незалежними змінними, які визначають енергію удару $A_{y\delta}$, є напруга $U_{\epsilon.n.e.}$, ємність $C_{\epsilon.n.e.}$ та переміщення робочого органу δ .

Електрична енергія W_{el} ємнісного накопичувача задається таким чином:

$$W_{el} = \frac{C_{\epsilon.n.e.} \cdot U_{\epsilon.n.e.}^2}{2}. \quad (3.3)$$

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		64

Динамічні параметри ЛЕМД – залежності $U_{жс} = f(t)$, $I = f(t)$ та $\delta = f(t)$ для пристрою, призначеного для вирубкування отворів і встановлення металевої фурнітури, можуть бути призначені як шляхом розв’язання відповідних диференціальних рівнянь, так і експериментально. На основі отриманих характеристик можна оцінити енергію удару $A_{уд}$, частоту ударів $n_{ход}$ та коефіцієнт корисної дії системи η , використовуючи як незалежні змінні напругу $U_{с.н.е.}$, ємність $C_{с.н.е.}$ та переміщення робочого органу δ .

Потрібно встановити залежність, використовуючи три незалежні фактори та змінюючи кожен із них на трьох рівнях.

$$A_y = f(C_{с.н.е.}, U_{с.н.е.}, \delta). \quad (3.4)$$

Межі варіювання факторів (нижні та верхні значення) визначено на основі попередніх розрахунків і результатів експериментальних досліджень. Обраний інтервал охоплює такі значення факторів, які є найбільш важливими під час розроблення силових ударних електромеханічних систем пресового обладнання легкої промисловості:

$$U_{с.н.е.} = 100 \dots 200 \text{ В}, \quad C_{с.н.е.} = 0,0012 \dots 0,004 \text{ Ф},$$

$$\delta = 0,005 \dots 0,015 \text{ м}.$$

Щоб визначити оптимальний режим роботи пристрою з ЛЕМД і з’ясувати, як на нього впливають ємність $C_{с.н.е.}$, напруга $U_{с.н.е.}$ конденсаторного накопичувача та величини переміщення ударника δ було проведено експериментальні дослідження за методом планування експерименту. Для цього застосовано некомпозіційні плани другого порядку, сформовані на основі вибірки типу 3^k .

Метою проведених експериментальних досліджень динамічних параметрів робочого процесу пристрою з ЛЕМД є визначення впливу вхідних факторів на величину енергії удару, а також пошук оптимального режиму його функціонування та побудова регресійного рівняння (3.4), що відображає отримані експериментальні дані.

У ході досліджень було встановлено базові рівні факторів і межі їх варіювання; відповідні значення наведено в таблиці Б.1 (додаток Б).

Для виконання планування експерименту та побудови рівняння регресії було застосовано програму «Planning experiment» (розробник — кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем; ліцензія — вільне користування) [47]. У цьому програмному забезпеченні реалізовано некомпозиційний план другого порядку, сформований на основі вибірки типу 3к.

Після введення до програми кількості факторів та їхніх верхніх і нижніх рівнів було визначено необхідну кількість дослідів, сформовано матриці планування та значень, обчислено коефіцієнти регресійного рівняння, дисперсії цих коефіцієнтів, дисперсію параметра оптимізації, а також отримано саме рівняння регресії.

Згідно з некомпозиційним планом другого порядку для трьох факторів необхідно виконати 15 експериментів. У центрі плану, тобто за нульових рівнів усіх факторів ($x_1 = x_2 = x_3 = 0$), передбачено проведення трьох дослідів (№ 5, 10, 15). Відповідна матриця планування наведена в табл. Б.2 (додаток Б).

Матрицю плану, сформовану за допомогою програми «Planning experiment», подано в табл. Б.3 (додаток Б) [41]. У таблиці Б.4 (додаток Б) наведено коефіцієнти регресійного рівняння, отримані за результатами обчислень у програмі.

У табл. Б.5 (додаток Б) подано дисперсії коефіцієнтів регресії, визначені цим же програмним засобом. Дисперсія параметра оптимізації S_y^2 розрахована програмою «Planning experiment», становить $S_y^2 = 0,1075$.

Для підтвердження отриманого програмою значення дисперсії S_y^2 було виконано її розрахунок вручну відповідно до методики з [47]. Для цього складено допоміжну таблицю (табл. Б.6, додаток Б). Значення SE — це сума квадратів, що використовується при визначенні дисперсії S_y^2 на основі результатів дослідів, проведених у центрі плану.

Дисперсію S_y^2 параметра оптимізації обчислено з урахуванням відповідної кількості ступенів вільності:

$$f_2 = n_0 - 1 = 3 - 1 = 2,$$

де n_0 – число паралельних дослідів в центрі плану, $n_0 = 3$.

Отримане розрахунковим методом значення дисперсії S_y^2 параметра оптимізації повністю збігається з результатом, визначеним програмою «Planning experiment».

Процес, що досліджується [48], у програмі «Planning experiment» подано у вигляді поліноміального рівняння другого порядку в кодованій формі:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2, \quad (3.5)$$

де $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{11}, b_{22}, b_{33}$ – коефіцієнти рівняння регресії.

Перевірку статистичної значущості коефіцієнтів у рівнянні регресії здійснюємо шляхом порівняння абсолютного значення кожного коефіцієнта з межами його довірчого інтервалу, який обчислюється за відповідною формулою:

$$\Delta b_i = \pm t_T \cdot S_{b_i}, \quad (3.6)$$

де t_T – табличне значення критерію при заданому рівні значущості та кількості ступенів свободи f_2 , на основі яких обчислено дисперсію S_y^2 параметра оптимізації (для $f_2 = 2$ та рівня значущості 5 % табличне значення становить $t_T = 4,3$);

S_{b_i} – похибка у визначенні i -го коефіцієнта регресії.

Похибку визначення i -го коефіцієнта регресії обчислюють так:

$$S_{b_i} = +\sqrt{S_{b_i}^2}, \quad (4.7)$$

де $S_{b_i}^2$ – дисперсія i -го коефіцієнта регресії [47-48].

Коефіцієнт вважається статистично значущим, якщо його абсолютне значення перевищує довірчий інтервал. Якщо ж абсолютна величина коефіцієнта є меншою за довірчий інтервал, він вважається незначущим і може бути вилучений із регресійного рівняння.

Довірчі інтервали для коефіцієнтів рівняння регресії визначено за формулою (3.6):

$$\Delta b_{i1} = \pm 0,7052; \Delta b_i = \pm 0,4979; \Delta b_{ii} = \pm 0,7336; \Delta b_0 = \pm 0,8136.$$

Оскільки значення коефіцієнтів b_{11} , b_{12} та b_{33} виявилися меншими за відповідний довірчий інтервал, їх можна вважати статистично незначущими й вилучити з регресійної моделі. Після усунення коефіцієнтів b_{11} , b_{12} та b_{33} рівняння регресії (3.4) набуває такого вигляду:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{22} \cdot x_2^2. \quad (3.8)$$

Підставивши у рівняння (3.8) значення коефіцієнтів регресії, наведених у табл. 4.4, одержимо таке вираження:

$$y = 4,5400 + 1,7487x_1 + 1,0775x_2 + 2,2162x_3 + 1,175x_1 \cdot x_3 + 0,7925x_2x_3 - 0,835x_2^2. \quad (3.9)$$

Розкодована форма рівняння регресії має такий вигляд:

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк. 68
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$\begin{aligned}
y = & 4,54 + 1,7487 \left(\frac{x_1 - 150}{50} \right) + 1,0775 \left(\frac{x_2 - 0,0026}{0,0014} \right) + \\
& + 2,2162 \left(\frac{x_3 - 0,01}{0,005} \right) + 1,175 \left(\frac{x_1 - 150}{50} \right) \cdot \left(\frac{x_3 - 0,01}{0,005} \right) + \quad . \quad (3.10) \\
& + 0,7925 \left(\frac{x_2 - 0,0026}{0,0014} \right) \cdot \left(\frac{x_3 - 0,01}{0,005} \right) - 0,835 \left(\frac{x_2 - 0,0026}{0,0014} \right)^2
\end{aligned}$$

Адекватність отриманого поліноміального рівняння другого порядку оцінюємо за F – критерієм Фішера [39, 40]. Для цього спершу обчислюємо дисперсію адекватності S_{ad}^2 за таким виразом:

$$S_{ad}^2 = \frac{S_R - S_E}{f_1}, \quad (3.11)$$

де S_R – сума квадратів різниць між розрахунковими значеннями Y_P та експериментальними значеннями Y_e функції відгуку у всіх точках плану;

f_1 – число степенів свободи:

$$f_1 = N - k' - (n_0 - 1), \quad (3.12)$$

де N – кількість дослідів у матриці планування; $N = 15$;

k' – число коефіцієнтів регресійного рівняння (3.8), $k' = 7$;

Розраховані значення функції відгуку Y_P , отримані за рівнянням регресії (3.10), а також середнє експериментальне значення Y_e , визначене на основі трьох паралельних дослідів, різниця $Y_P - Y_e$ та величина S_R наведені в табл. Б.7 (додаток Б).

Дисперсію адекватності S_{ad}^2 визначаємо за формулою (3.11):

$$S_{ad}^2 = \frac{S_R - S_E}{f_1} = \frac{2,7980 - 0,215}{15 - 7 - (3 - 1)} = 0,4305.$$

Дисперсію адекватності S_{ad}^2 визначено з числом степенів свободи $f_1 = 6$.

Розрахункове значення F -критерію обчислюємо за формулою [47-48]:

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} = \frac{0,4305}{0,1075} = 4,0. \quad (3.13)$$

За рівня значущості 5 % і ступенями свободи $f_1 = 6$ та $f_2 = 2$ табличне значення становить $F_T = 19,2$ [48]. Рівняння регресії вважається адекватним, якщо виконується умова: $F_p < F_T = 4,0 < 19,2$. Таким чином, отримане рівняння регресії є адекватним.

Підставивши в рівнянні (3.9) замість кодованих значень факторів їх натуральні значення, одержуємо:

$$\begin{aligned} A_{y\delta} = & 4,5400 + 1,7487 \left(\frac{U_{\epsilon.n.e.} - 150}{50} \right) + 1,0775 \left(\frac{C_{\epsilon.n.e.} - 0,0026}{0,0014} \right) + \\ & + 2,2162 \left(\frac{\delta - 0,01}{0,005} \right) + 1,175 \left(\frac{U_{\epsilon.n.e.} - 150}{50} \right) \cdot \left(\frac{\delta - 0,01}{0,005} \right) + \quad (3.14) \\ & + 0,7925 \left(\frac{C_{\epsilon.n.e.} - 0,0026}{0,0014} \right) \cdot \left(\frac{\delta - 0,01}{0,005} \right) - 0,835 \left(\frac{C_{\epsilon.n.e.} - 0,0026}{0,0014} \right)^2 \end{aligned}$$

Коефіцієнти регресійного рівняння (3.9) у кодованій формі характеризують ступінь впливу факторів ($C_{\epsilon.n.e.}$, $U_{\epsilon.n.e.}$, δ) на вихідний параметр $A_{y\delta}$ і є мірою цього впливу.

Отримана регресійна модель відображає залежність енергії удару $A_{y\delta}$ від напруги $U_{c.n.e.}$, ємності $C_{c.n.e.}$ ємнісного накопичувача та величини переміщення ударника. Аналіз коефіцієнтів рівняння (3.9) свідчить, найбільший вплив на енергію удару $A_{y\delta}$ справляють переміщення робочого органу δ , напруга $U_{c.n.e.}$, а також їх взаємодія. Найменший вплив має ємність $C_{c.n.e.}$ ємнісного накопичувача. Це можна пояснити тим, що при малих значеннях переміщення δ (0,005 м та 0,01 м) ударник не встигає отримати достатню кінетичну енергію і формується переважно за рахунок електромагнітної сили, що виникає в ЛЕМД. У результаті мінімальні експериментальні значення енергії удару $A_{y\delta}$ спостерігаються за умов (таблиця 3.3, додаток Б):

$$U_{c.n.e.} = 100 \text{ В}; C_{c.n.e.} = 0,0012 \text{ Ф}; \delta = 0,01 \text{ м} - A_{y\delta} = 0,76 \text{ Дж};$$

$$U_{c.n.e.} = 100 \text{ В}; C_{c.n.e.} = 0,0026 \text{ Ф}; \delta = 0,005 \text{ м} - A_{y\delta} = 1,31 \text{ Дж};$$

$$U_{c.n.e.} = 150 \text{ В}; C_{c.n.e.} = 0,0012 \text{ Ф}; \delta = 0,005 \text{ м} - A_{y\delta} = 1,36 \text{ Дж}.$$

При переміщенні робочого органу δ на 0,015 м ударник здійснює удар завдяки електромагнітної сили та накопиченої кінетичної енергії ЛЕМД, поєднанню електромагнітної сили та накопиченої кінетичної енергії ЛЕМД, тому максимальні значення енергії удару $A_{y\delta}$ при цих умовах становитимуть (таблиця Б.7, додаток Б):

$$U_{c.n.e.} = 200 \text{ В}; C_{c.n.e.} = 0,0026 \text{ Ф}; \delta = 0,015 \text{ м} - A_{y\delta} = 9,98 \text{ Дж};$$

$$U_{c.n.e.} = 150 \text{ В}; C_{c.n.e.} = 0,0040 \text{ Ф}; \delta = 0,015 \text{ м} - A_{y\delta} = 8,28 \text{ Дж}.$$

Такі експериментальні значення $A_{y\delta}$ підтверджуються розрахунками, виконаними за рівнянням (3.14) та наведені в таблиці Б.7 (додаток Б).

Для наочного представлення результатів трифакторного експерименту побудовано графічну залежність досліджуваної поверхні відгуку в аксонометрії.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк. 71
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Вона демонструє комплексний вплив трьох факторів на енергію удару $A_{y\delta}$, при цьому один фактор залишають незмінним, оскільки при одночасному варіюванні всіх трьох факторів побудувати просторову фігуру неможливо.

На рисунку 3.3 подано графік залежності функції відгуку $A_{y\delta} = f(C_{c.n.e.}, U_{c.n.e.})$ від ємності $C_{c.n.e.}$ й напруги $U_{c.n.e.}$ ємнісного накопичувача на рівні від «-1» до «+1» при сталому переміщенні δ робочого органу ($\delta = 0,015$ м).

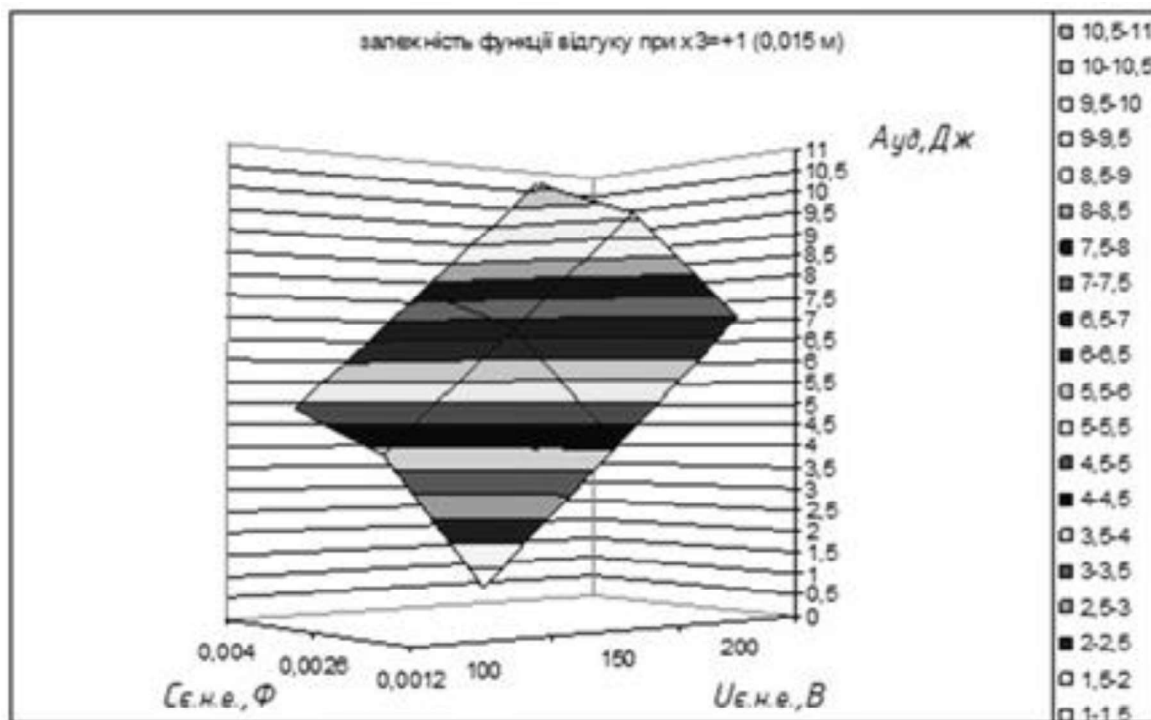


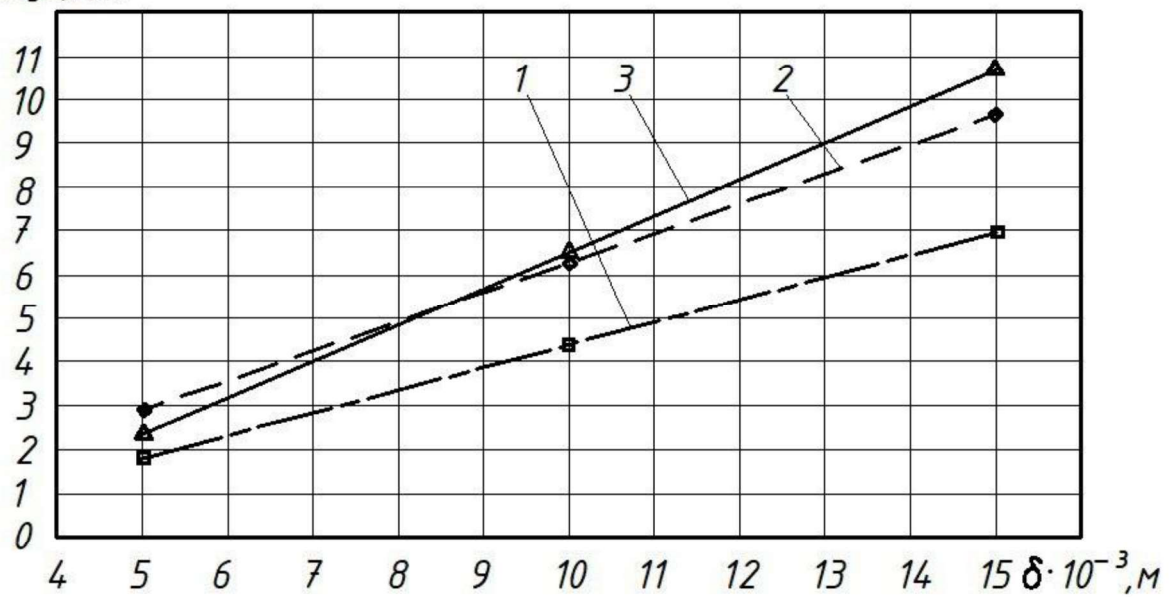
Рисунок 3.3 - Графік залежності функції відгуку енергії удару $A_{y\delta} = f(C_{c.n.e.}, U_{c.n.e.})$ при ємності $C_{c.n.e.}$ та напрузі $U_{c.n.e.}$ ємнісного накопичувача на рівні від «-1» до «+1» при незмінному переміщенні робочого органу δ

На рисунку 3.4 представлено графік залежності енергії удару від переміщення робочого органу $A_{y\delta} = f(\delta)$ при $U_{c.n.e.} = 200$ В для ємностей: 0,0012 Ф; 0,0026 Ф; 0,0040 Ф.

Графік залежності енергії удару від напруги $A_{y\delta} = f(U)$ при $\delta = 0,015$ м для тих самих значень ємностей (0,0012 Ф; 0,0026 Ф; 0,0040 Ф) наведено на рис. 3.5.

Залежність енергії удару від ємності $A_{y\delta} = f(C)$ при $\delta = 0,015$ м для напруг: 100 В; 150 В; 200 В відображено на рисунку 3.6.

$A_{уд}, Дж$

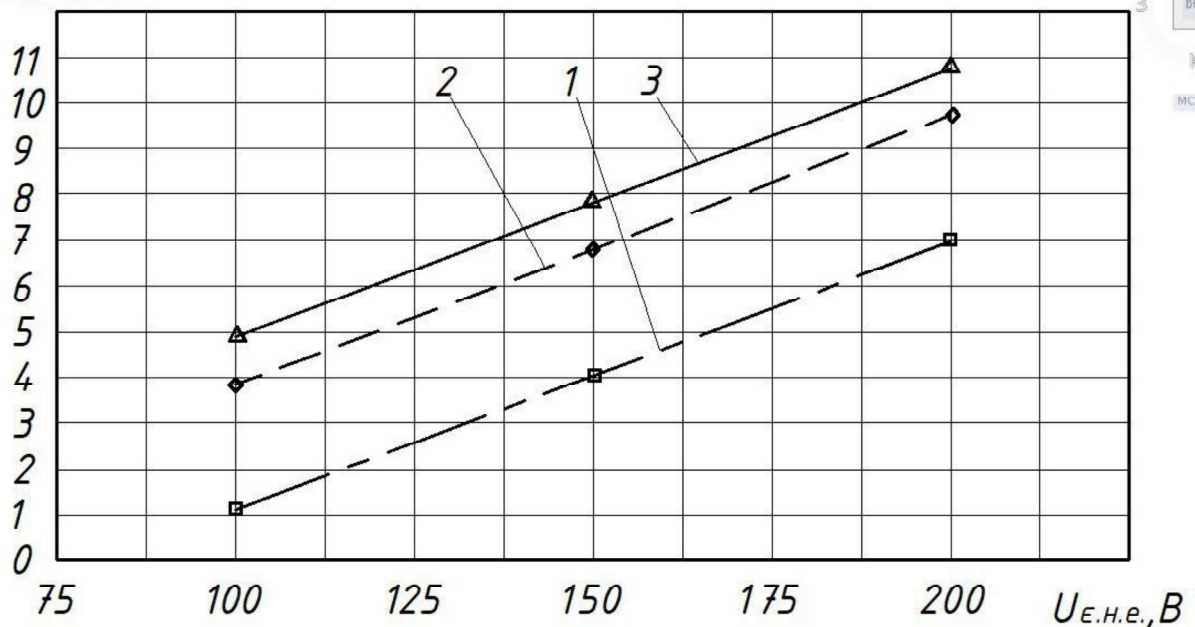


1 – 0,0012 Ф; 2 – 0,0026 Ф; 3 – 0,0040 Ф

Рисунок 3.4 - Графік залежності енергії удару від переміщення робочого органу

$A_{уд} = f(\delta)$ при $U = 200 В$ для ємностей:

$A_{уд}, Дж$



1 – 0,0012 Ф; 2 – 0,0026 Ф; 3 – 0,0040 Ф

Рисунок 3.5 - Графік залежності енергії удару від напруги $A_{уд} = f(U_{є.н.е.})$

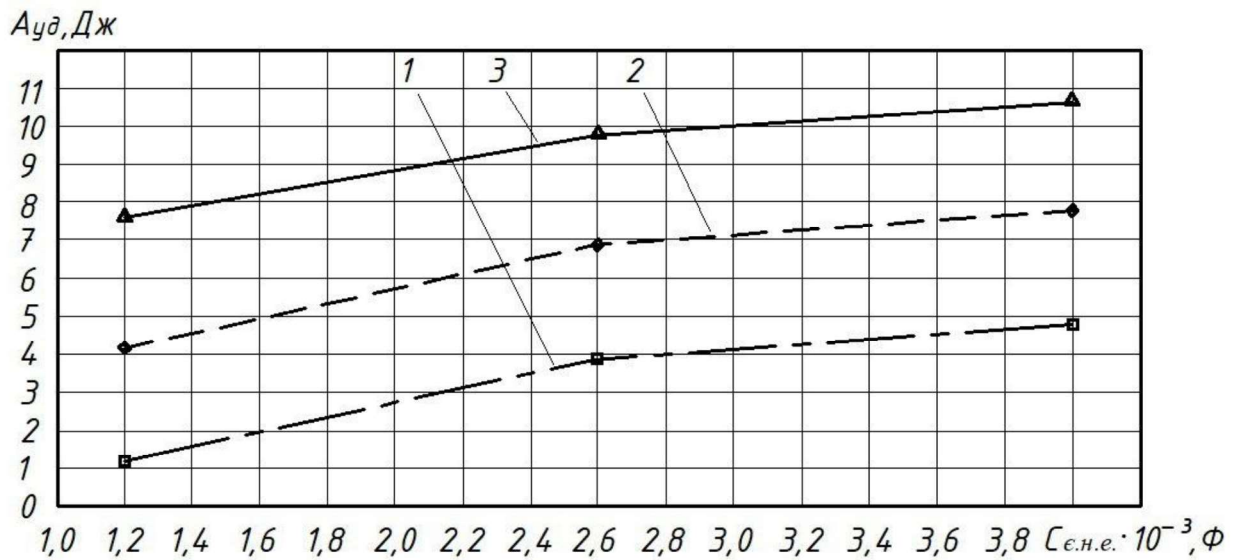
при $\delta = 0,015 м$ для ємностей:

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА25.00.00.000 ПЗ

Арк.

73



1 – 100 В; 2 – 150 В; 3 – 200 В

Рисунок 3.6 - Графік залежності енергії удару від ємності $A_{y\delta} = f(C_{e.n.e.})$ при $\delta = 0,015$ м для напруги:

Залежність (3.14) представляє собою апроксимовану математичну модель силової електромеханічної системи пресового обладнання для легкопромислових операцій і може застосовуватися для швидкого аналізу при розробці та проектуванні аналогічного обладнання [48].

Застосування статистичних методів планування багатофакторного експерименту дозволило не лише встановити аналітичну залежність параметрів ЛЕД, зокрема: енергії удару $A_{y\delta}$ від параметрів ємнісного накопичувача (напруги $U_{e.n.e.}$ і ємності $C_{e.n.e.}$) і зазору δ між якором двигуна та стопом, а й істотно зменшити кількість необхідних дослідів. Це особливо важливо щодо проведення експериментів на реальному обладнанні.

3.3 Проведення експериментальних досліджень на пристрої з двохкоординатною системою

Після попереднього визначення роботи, необхідної для формування одного отвору у вибраному матеріалі, та використання отриманого рівняння регресії

(3.14), були встановлені всі основні параметри, які забезпечують коректну роботу електроживлення та ударного механізму. На основі цього рівняння визначено значення напруги живлення $U_{\text{с.н.с.}}$, а також ємність $C_{\text{с.н.с.}}$ ємнісного накопичувача, що забезпечує формування необхідного енергетичного імпульсу для ЛЕМД. Окрім цього, було задано величину переміщення ударника δ , яка визначає кінематичний режим роботи лінійного електромагнітного приводу та прямо впливає на енергію удару при перфоруванні.

Після налаштування зазначених параметрів проведено серію експериментальних випробувань на двохкоординатній системі, у ході яких ударний механізм здійснював технологічну операцію перфорування матеріалу заготовки. У результаті ударник забезпечив повне проникнення пробійника крізь деталь взуття, що підтвердило коректність теоретичних розрахунків енерговитрат та ефективність застосованого рівняння регресії для визначення режимів роботи. Це дозволяє стверджувати, що отримані формули і математичні залежності придатні для практичного прогнозування енергії удару ударника пресового обладнання з ЛЕМД при виконанні операцій руйнування.

На рис. 3.7 наведено зображення фрагмента матеріалу з сформованими отворами, отриманого в результаті виконання експериментів. Візуальна оцінка якості перфорації підтвердила стабільність процесу, відсутність деформацій країв отворів та достатню точність позиціонування інструмента відносно поверхні матеріалу. Проведення перфорації серії з 60 отворів у повністю автоматичному режимі роботи також підтвердило надійність програмного забезпечення, що керує двохкоординатною системою, та працездатність мехатронної установки в цілому.

Розроблений експериментальний комплекс, що включає двохкоординатну систему переміщення та ЛЕМД як ударний виконавчий механізм, є повноцінною мехатронною установкою нового покоління. Її застосування дозволяє значно розширити функціональні можливості сучасних пристроїв з числовим програмним керуванням, зокрема у галузях легкої, деревообробної, текстильної та взуттєвої

промисловості. Такий підхід забезпечує можливість переміщення робочого органу по довільній траєкторії у площині, а також дає змогу виконувати перфорування по складних контурах і комбінованих орнаментах, що недоступно для обладнання з фіксованою траєкторією руху.

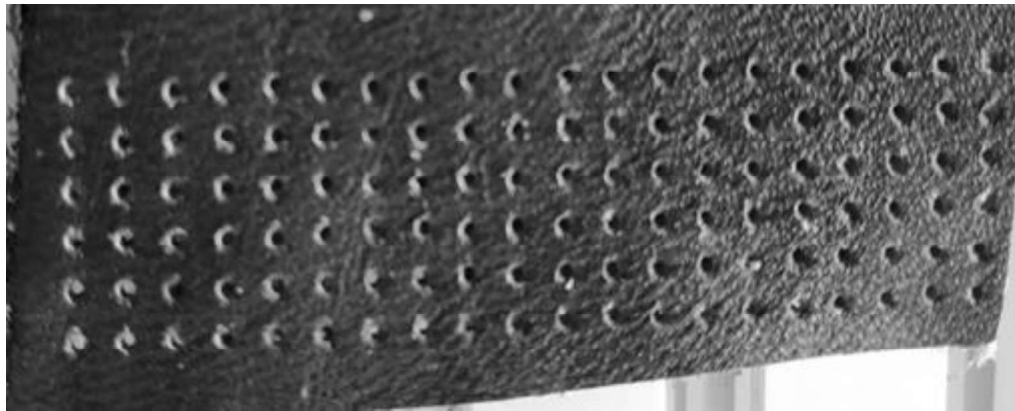


Рисунок 3.7 - Фото отриманої деталі верху взуття із перфорацією

Окрім технологічних переваг, використання двохкоординатної системи з ЛЕМД створює умови для більш гнучкого керування енергією удару завдяки електромагнітному характеру приводу та можливості точного дозування імпульсу. Це сприяє підвищенню якості перфорування, зменшенню навантажень на інструмент і забезпечує стабільність роботи навіть при обробці матеріалів різної товщини та жорсткості.

Таким чином, проведені експериментальні дослідження підтвердили ефективність та функціональність розробленої установки, а також показали, що використання математичної моделі й рівняння регресії (3.14) дозволяє точно прогнозувати режими роботи ЛЕМД і забезпечувати якісне виконання технологічних операцій на двохкоординатній системі.

3.4 Висновки до третього розділу

У третьому розділі узагальнено результати дослідження робочих процесів пристрою з лінійним електромагнітним двигуном для виконання операції перфо-

рування. Показано, що використання методів планування багатофакторного експерименту дозволяє раціонально обрати кількість дослідів, визначити вплив основних факторів – напруги зарядки $U_{c.n.e}$, ємності $C_{c.n.e}$ ємнісного накопичувача та переміщення ударника δ – на енергію удару $A_{уд}$, а також одержати адекватну математичну модель процесу у вигляді рівняння регресії. Встановлено, що найбільший вплив на енергію удару мають напруга живлення та переміщення ударника, тоді як вплив ємності накопичувача є менш суттєвим у дослідженому діапазоні.

Експериментальні дослідження на пристрої з двохкоординатною системою переміщення підтвердили працездатність отриманих теоретичних залежностей і коректність вибраних режимів роботи: задані за моделлю параметри забезпечили якісне перфорування деталей верху взуття та стабільність процесу в автоматичному режимі.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		77

ВИСНОВКИ

У ході виконання магістерської роботи було проведено комплексний теоретичний, конструктивний та експериментальний аналіз пресового обладнання з лінійним електромагнітним двигуном, спрямований на підвищення ефективності процесів ударного руйнування матеріалів легкої промисловості, зокрема операцій перфорації.

У теоретичній частині узагальнено особливості процесів локального руйнування матеріалів і встановлено, що якість перфорації визначається сукупністю технологічних параметрів: ударною енергією, швидкістю і прискоренням ударника, величиною робочого зазору, геометрією інструмента та напружено-деформованим станом матеріалу. Проведений огляд обладнання дозволив визначити переваги та обмеження механічних, пневматичних, гідравлічних і електромеханічних систем, а також показав перспективність застосування імпульсних електромагнітних приводів для сучасних високоточних технологій.

Аналіз технічних рішень і класифікації лінійних електричних двигунів дав змогу обґрунтувати вибір ЛЕМД δ -типу як найбільш раціонального варіанта приводу для ударних операцій. Зокрема, конструкції з комбінованим якорем і стопом характеризуються сприятливою тяговою характеристикою, високими інтегральними енергетичними показниками, простотою виготовлення і надійністю в режимах короткочасної ударної дії.

У роботі розроблено структурні схеми пристроїв живлення та керування, що забезпечують формування короткочасних високих імпульсів необхідної енергії. Створено конструкцію ЛЕМД, виконано його інтеграцію в пресове обладнання.

Розроблена експериментальна установка дала можливість проводити дослідження динаміки ударних процесів, реєструвати параметри імпульсів, аналізувати поведінку інструмента та матеріалу.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк. 78
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Експериментальні дослідження підтвердили високу повторюваність параметрів удару, можливість точного регулювання енергії та відповідність динамічних характеристик технологічним вимогам перфорації. Отримані результати засвідчили, що використання ЛЕМД у пресовому обладнанні дозволяє підвищити якість формованих отворів, зменшити знос інструмента та забезпечити адаптивність режимів під різні матеріали.

Узагальнюючи результати трьох розділів, можна зробити висновок, що розроблена система пресового обладнання з лінійним електромагнітним приводом є ефективним технічним рішенням для виконання імпульсних технологічних операцій легкої промисловості. Вона поєднує високу точність, технологічну гнучкість, енергоефективність та можливість інтеграції у сучасні автоматизовані виробничі комплекси. Отримані наукові положення, технічні рішення та практичні рекомендації можуть бути використані при створенні нового покоління ударних машин та при подальших дослідженнях імпульсних електромеханічних систем.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		79

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Федорак, В. І. (2019). Сучасні тенденції інноваційного розвитку підприємств легкої промисловості в умовах глобалізації. Вчені записки Університету «КРОК», 2019. – (2 (54)), С. 231–236.

2. Касьян Л. А. Стан та перспективи розвитку легкої промисловості України / Л. А. Касьян // Науковий вісник Ужгородського національного університету. – 2016. – Вип. №6. – Ч. 1. – С. 147–150.

3. Болюх В. Ф. Лінійні імпульсні електромеханічні перетворювачі : монографія / В. Ф. Болюх, К. В. Коритченко, О. І. Кочерга ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків : Планета-Принт, 2022. – 288 с.

4. Поліщук О.С. Процес передачі енергії при ударному виконанні операцій легкої промисловості: міжвузівський збірник «Наукові нотатки» – Луцьк, 2018. – Випуск № 63 – С. 163-171.

5. 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.

6. Перфорація: визначення, значення та застосування у житті [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://65000.com.ua/shho-take-perforatsiya-vuznachennya-znachennya-ta-zastosuvannya-u-zhytti/>

7. Як виконується перфорація [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ua.baccorack.com/info/how-is-perforation-done--96871129.html>.

8. Матеріалознавство : навч. посіб. / В.І. Бузило, В.П. Сердюк, А.В. Яворський, О.А. Гайдай / М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка» – Дніпро : НТУ «ДП», 2021. – 243 с .

9. Strength and durability of modern materials and construction. Proceeding of the International Conference “Strength and durability of modern materials and

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк. 80
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

construction” (Ternopil, November 10-11, 2022).– Ternopil: PE Palianytsia V. A., 2022 – 265 p.

10. Механічні преси. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.stankom.com/ua/press-mehanicheskij/>.

11. Пневматичний прес [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://spc.com.ua/blogs/solutions/pneumatic-press?srsltid=AfmBOopD0-26QYLWelvddYy-wsNhXNANZGv3yicIzoDL-8gJFdLKNqn7>.

12. Преси гідравлічні [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://marketstan.com/ua/g89725047-pressy-gidravlicheskie>.

13. Електромеханічні приводи: <https://metal-work.com.ua/ua/g15664376-elektromehanicheskie-privody>.

14. Поліщук О. С. Пресове обладнання з підвищеними енергетичними характеристиками для виконання операцій вирубування та перфорації деталей взуття в легкій промисловості / Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки, 2018. – №4. – С. 22-29.

15. Механіка руйнування. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://btpm.nmu.org.ua/ua/download/lecture-course/132%20%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%81%D0%BF%20%D0%BB%D0%B5%D0%BA%20%D0%BC%D0%B5%D1%85%D0%B0%D0%BD%D1%96%D0%BA%D0%B0%20%D1%80%D1%83%D0%B9%D0%BD%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F.pdf>.

16. Експериментальне вивчення руйнування матеріалів після ударно-хвильового навантаження [Електронний ресурс]. – Режим доступу: file:///C:/Users/%D0%9E%D0%BB%D1%8C%D0%B3%D0%B0/Downloads/15_Zhuk_2023_2.pdf.

17. Руйнування металів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://vikant.com.ua/ua/news/razrushenie_metallov.

18. Поліщук О.С. Кармаліта А.К., Бурмістенков О.П. Полімерні матеріали для виробництва виробів легкої промисловості та їх фізико-механічні властивості

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк. 81
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

/ Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки, 2018. – №2. – С. 134-140.

19. Поліщук О. С. Процес передачі енергії при ударному виконанні операцій легкої промисловості / Наукові нотатки, 2018. – №63. – С. 163-171.

20. Поліщук О. С. Розробка схем живлення і керування силовими електро-механічними ударними системами в пресовому обладнанні легкої промисловості / О. С. Поліщук // East European Scientific Journal. – 2019. – № 1. – Part 1. – P. 22–28.

21. Прес для установки фурнітури Mareew ML 808 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://sweika.com.ua/ua/252-mareew-ml-808>.

22. Прес пневматичний RVT3600 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://surl.li/cvodwe>.

23. Гідравлічний прес з поворотною траверсою [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.worldoftest.com/es/hydraulic-swing-arm-clicker-press>

24. Електромагнітний прес для встановлення металофурнітури. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://surl.lu/hbprfg>.

25. ЧПУ прес-гиби: остаточний посібник. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.adhmt.com/uk/cnc-press-brakes/>

26. Впровадження імпульсних джерел живлення . [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.kosunpower.com/news-show-1038130.html>.

27. Синюк О.М. Експериментальне дослідження процесу утворення спаїв та впливу орієнтації спаїв на експлуатаційні властивості полімерних виробів / О.М. Синюк, М.Є. Скиба // Вісник Хмельницького національного університету, 2005. – № 4. – Ч. 1. – Т. 2. – С. 245-248.

28. Синюк О.М. Експериментальні дослідження руйнування поліетиленових та поліпропіленових плівок / О.М. Синюк // Міжнародний науковий журнал «Проблеми трибології». – Хмельницький : ХНУ, 2017. – № 4 (86). – С. 51-59.

29. Синюк О.М. Математична модель анізотропних властивостей поліме-

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		82

рних матеріалів / О.М. Синюк // Вісник Хмельницького національного університету. – 2015. – №1. – С. 12-18.

30. Магнітоелектричний двигун з високою щільністю крутного моменту. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/f900c08d-37c1-44a5-a187-5bb420739341/content>.

31. Теоретичні основи автоматики. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://itf.snau.edu.ua/wp-content/uploads/2025/04/21_9.pdf.

32. Особливість використання лінійних електродвигунів та методи розрахунку параметрів. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <file:///C:/Users/%D0%9E%D0%BB%D1%8C%D0%B3%D0%B0/Downloads/j.isjea.20230204.07.pdf>.

32. Білий Л.А., Поліщук О.С., Лісевич С.П., Поліщук А.О., Лучинський М.А. Порівняльний аналіз методів розрахунку періодичних процесів нелінійних електромеханічних систем. / Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки, 2021. – №1. – С.93-96.

33. Zozulia P.F., Kostyuk N.O., Polishchuk O.S. The influence of geometric parameters of an extruder screw on the process of treatment of thermoplastic materials / Colloquium-journal, 2020. – №3. – Part 2. – P.45-49.

34. Polishchuk O.S. The calculation of technological effort for impact perforation and parts and products marking / The journal of Almaty Technological University, 2018. – №4. – P.108-116.

35. Поліщук А., Пліщук О. Розробка методу проектування шнека екструдера 3D-принтера. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences, 2023. -№4/323. С.389-402

36. 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/>.

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						83
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

37. Основи розрахунків на міцність: конспект лекцій / В.І. Мороз, О.А. Логвіненко, В.І. Іщенко, О.В. Фомін. – Харків: УкрДАЗТ, 2012. -312с.
38. Система накопичення енергії. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://artenergo.com/napriamki-diialnosti/sistema-nakopichennia-energiyi>.
39. І.О. Сінчук, С.М. Бойко. Системи накопичення електричної енергії. Підручник / І.О. Сінчук, С.М. Бойко; під ред. доктора технічних наук, професора О.М. Сінчука. – Кривий Ріг, 2020. – 219 с.
40. Структурні схеми імпульсних блоків живлення. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.youtube.com/watch?v=i2JezJS3GSM>.
42. Імпульсний блок живлення. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/28803/2/TPARP_2019_Kovalyova_T-Pulse_power_supply_on_122-124.pdf.
43. Павлище В.Т. Основи конструювання та розрахунку деталей машин: Підруч.– 2-ге вид.перероб. – Львів: Афіша. 2003. – 560 с.
44. Основи розрахунків на міцність: конспект лекцій / В.І. Мороз, О.А. Логвіненко, В.І. Іщенко, О.В. Фомін. – Харків: УкрДАЗТ, 2012. -312с.
45. Технічне обслуговування обладнання. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.scribd.com/document/87017857294%D0%9D%D0%90%D0%9D%D0%9D%D0%AF>.
46. Застосування активних експериментів при ідентифікації моделей. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://web.posibnyku.vntu.edu.ua/fksa/2kvetnyj_komp%27yuterne_modelyuvannya_system_procesiv/t2/514..htm.
47. Регресійний аналіз і планування експериментів. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://vysloukh.in.ua/6_Regres_analiz1.pdf.
48. А. О. Поліщук. Експериментальне дослідження об'ємної продуктивності шнекового екструдера 3D-принтера. - Вісник ХНТУ. № 4(87), 2023 р. С. 117-128.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк. 84
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						85
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК Б

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						86
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		