

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


## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

# Розробка пристрою з електромагнітним приводом для ударного маркування та перфорації деталей

Галузь знань 14 Електрична інженерія  
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

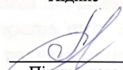
Шифр БРМА 24.00.00.000 ПЗ

Виконав студент  
4 курсу групи ЕТ-20-1

  
Підпис

Кравчук Д.Ю.  
Ініціали, прізвище

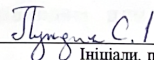
Керівник

  
Підпис, дата

д.т.н., проф. Поліщук О.С.  
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер

  
Підпис, дата

  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:  
Зав. кафедри МАЕЕС

  
Підпис, дата

д.т.н., проф. Поліщук О.С.  
Ініціали, прізвище

11 06 2024 р.

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

11. 06 .2024

## З А В Д А Н Н Я НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

**Кравчук Денис Юрійович**

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи **Розробка пристрою з електромагнітним приводом для ударного маркування та перфорації деталей керівник роботи Поліщук О.С., д.т.н., проф.**

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

Затверджено наказом ректора університету від 15 02 2024 р. № 8

2. Строк подання студентом роботи на кафедру МАЕЕС

3. Вихідні дані до роботи: **технічні характеристики устаткування для ударного маркування та перфорації деталей.**

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

**1 Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики бакалаврської роботи**

**2 Розробка пристрою з електромагнітним приводом для ударного маркування та перфорації деталей**

**3 Розрахунки, що підтверджують працездатність конструкції пристрою з електромагнітним приводом**

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

**Аркуш 1. Лінійний електричний двигун. Док. оглядовий (A1). Аркуш 2.**

**Пристрій з двохкоординатною системою руху. Схема структурна комбінована (A1). Аркуш 3. Лінійний електромагнітний двигун. Вид загальний (A1). Аркуш 4. Пристрій з двохкоординатною системою руху.**

**Схема електрична (A1). Аркуш 5. Пристрій з двохкоординатною системою руху. Габаритне креслення (A1).**

### 6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи


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

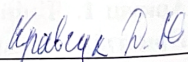
7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

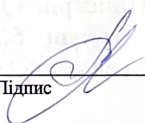
Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1 Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики бакалаврської роботи	20.05.24р.	
2 Розробка пристрою з електромагнітним приводом для ударного маркування та перфорації деталей	02.06.24р.	
3 Розрахунки, що підтверджують працездатність конструкції пристрою з електромагнітним приводом	17.06.24р.	
4 Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу	21.06.24р.	

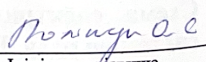
Студент

  
 \_\_\_\_\_  
 Підпис

  
 \_\_\_\_\_  
 Ініціали, прізвище

Керівник роботи

  
 \_\_\_\_\_  
 Підпис

  
 \_\_\_\_\_  
 Ініціали, прізвище

# АНОТАЦІЯ

до бакалаврської кваліфікаційної роботи студента  
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

1. Прізвище, ім'я та по батькові **Кравчук Денис Юрійович**

2. Тема бакалаврської роботи

**Розробка пристрою з електромагнітним приводом для ударного маркування та перфоратії деталей**

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 5 арк., сторінок записки 83

5. Основні розділи розрахунково-пояснювальної записки:

**1 Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики бакалаврської роботи**

**2 Розробка пристрою з електромагнітним приводом для ударного маркування та перфоратії деталей**

**3 Розрахунки, що підтверджують працездатність конструкції пристрою з електромагнітним приводом**

**Висновки**

**Перелік джерел посилання**

Підпис студента

"17" 06 2024 р.

## РІШЕННЯ ЕК:

Протокол №2 від "26" 06 2024 р.

Оцінка проекту ЕК

Рекомендації ЕК

Висновок / А  
визволення у виробництво





Особливі відмітки

Технічний секретар

"26" 06 2024 р.

## ЗМІСТ

		стор.
	Вступ	6
1	Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики бакалаврської роботи	9
1.1	Класифікація технологічних процесів у легкій промисловості, що базуються на застосуванні ударного впливу	9
1.2	Пресове обладнання використовуване для виконання операцій легкої промисловості та характеристика приводів, що в ньому застосовуються	10
1.3	Порівняння показників існуючого пресового обладнання за системою об'єктивних критеріїв	19
1.4	Шляхи модернізації пресового обладнання	21
1.5	Інноваційні імпульсні методи для ударних процесів у легкій промисловості	22
1.6	Інноваційний привод з ЛЕД для імпульсних технологій	24
<del>Ж</del>	Висновки до першого розділу	28
2	Розробка пристрою з електромагнітним приводом для ударного маркування та перфорації деталей	30
2.1	Структура силової електромеханічної ударної системи для пресового устаткування	30
2.2	Енергетична структура силової електромеханічної ударної системи	33
2.3	Порівняльний аналіз типів лінійних електричних двигунів	35

БРМА24.00.00.000 ПЗ								
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата	Розробка пристрою з електромагнітним приводом для ударного маркування та перфорації деталей	Літера	Аркуш	Аркушів
Виконав	Кравчук						4	83
Перевір.	Поліщук							
Н.контр.								
Затвер.	Поліщук					ХНУ гр.ЕТ-20-1		

2.4	Проектування систем живлення та керування силовими електромеханічними ударними приводами в пресовому обладнанні легкої промисловості	39
2.5	Розробка структурної схеми пристрою	48
2.6	Розробка двохкоординатної системи переміщення деталей	49
2.7	Розробка лінійного електромагнітного двигуна з ударним механізмом	50
2.8	Створення системи керування електроприводом установки для перфорації на основі мікроконтролера	53
2.9	Пристрій живлення драйверів крокових двигунів	62
2.10	Розробка пристрою живлення та управління роботою лінійного електромагнітного двигуна	64
2.11	Розробка програмного забезпечення управління роботою пристрою з двохкоординатною системою переміщення	65
2.12	Загальний вигляд установки з двохкоординатною системою переміщення та мікроконтролерною системою керування	66
2.13	Висновки до другого розділу	66
3	Розрахунки, що підтверджують працездатність конструкції пристрою з електромагнітним приводом	68
3.1	Розрахунок пружини лінійного електромагнітного двигуна	68
3.2	Висновки до третього розділу	75
	Висновки	76
	Перелік джерел посилання	78
	Додатки	83

## ВСТУП

На сьогодні легка промисловість України є багатогалузевим комплексом із виготовлення одягу, взуття та шкіряно-галантерейних виробів. Підприємства легкої промисловості мають значний потенціал для розвитку і вдосконалення. Ось деякі можливості, які вони можуть використовувати: інновації в продукції (використання нових технологій і матеріалів для виробництва більш якісних і функціональних товарів); стале вдосконалення якості (зосередження на підвищенні якості продукції може допомогти залучити нових клієнтів і збільшити лояльність існуючих); розширення асортименту (додавання нових продуктів або ліній товарів, що відповідають змінюючимся потребам споживачів або новим трендам у моді); маркетинг та брендування (інвестування у маркетингові кампанії, щоб просувати свою продукцію на ринку та підвищувати усвідомленість про бренд); ефективне управління ланцюгом постачання (оптимізація процесів постачання та логістики може знизити витрати і покращити швидкість доставки); збільшення ефективності виробництва (використання автоматизованих систем та процесів може знизити витрати на працю та підвищити продуктивність); розвиток нових ринків (вибір нових географічних ринків або сегментів споживачів для розширення клієнтської бази); створення сталі екологічної продукції (підприємства можуть використовувати більш екологічно чисті матеріали та процеси виробництва, щоб зменшити свій вплив на навколишнє середовище); розвиток онлайн-продажів (розширення присутності в Інтернеті та використання електронної комерції може допомогти досягти нових клієнтів та збільшити обсяги продажів); партнерство та стратегічні співпраці (співпраця з іншими підприємствами або брендами може допомогти в розвитку нових продуктів або отриманні доступу до нових ринків).

Таким чином, для ефективної роботи підприємств потрібно забезпечення якості та конкурентоспроможності продукції. Якість виробів легкої промисловості, таких як одягу, взуття, шкіряно-галантерейних виробів тощо, обумовлюється обґрунтованим вибором основних й допоміжних матеріалів,

					БРМА 24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

досконалістю технологічного процесу та раціональною конструкцією устаткування [1-4].

На підприємствах легкої промисловості при виготовленні відповідних виробів широко використовуються технологічні операції, що виконуються на обладнанні (пресах) зі зворотно-поступальним рухом робочих органів. До такого обладнання можна віднести: клеймування, вирубування, перфорування, тиснення, маркування тощо. Ці процеси передбачають взаємодію працюючих частин пресів з матеріалами, які мають різні фізико-механічні характеристики. Взаємодія відбувається через удари: у деяких випадках приводний механізм преса повинен розрізати або пробивати отвори у матеріалі, а в інших – залишати відбитки на поверхні (тиснення), не пошкоджуючи його.

Під час виконання цих процесів, так само як і при здійсненні інших процесів легкої промисловості, відбувається втрата енергії. Головними причинами втрат є: недостатнє використання обладнання та його працездатність у режимі очікування під час виконання технологічних операцій; перерви в роботі, пов'язані з організаційними та іншими обставинами; несумісність енергетичних можливостей обладнання з обсягом виконуваних робіт. Також виникають втрати енергії в приводах машин. Несумісність типу приводу, його режиму роботи, потужності та інших параметрів з характеристиками технологічного процесу, який виконується на обладнанні, призводить до значних енергетичних втрат.

Сучасний напрямок розвитку пресового обладнання полягає у впровадженні комп'ютеризації, максимальному спрощенні приводу (як гідравлічного, так і механічного), а також у зменшенні споживання енергії за рахунок використання енергозберігаючих двигунів або частотного керування ними. Це значно підвищує ефективність пресового обладнання.

Використання різноманітних приводів, таких як електромеханічні, електрогідравлічні та пневматичні, у обладнанні для операцій легкої промисловості може призводити до складностей через потребу у проміжних кінематичних ланках та перетворювачах руху. Це може призводити до збільшення ваги та складності конструкції, а також зниження енергоефективності.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Однак, важливим напрямком для покращення технологічних процесів та обладнання є використання імпульсних методів, які дозволяють ефективно використовувати енергію. Серед цих методів, одним з перспективних підходів до удосконалення приводів машин легкої промисловості є застосування силових дискретних систем, заснованих на лінійних електричних двигунах (ЛЕД). Ці системи відрізняються низьким споживанням енергії, високою ефективністю та здатністю до прямого перетворення електричної енергії на механічну роботу, переміщуючи робочий орган по лінійній траєкторії. Таким чином, створення електромеханічного пресового обладнання з лінійними електричними двигунами як приводом є актуальним завданням [5, 6].

У різних галузях промисловості використовуються лінійні електричні двигуни (ЛЕД) для виконання різноманітних технологічних операцій. Проте, обговорювані операції відрізняються специфічністю: вони потребують точно дозованої сили удару, яка залежить від фізико-механічних характеристик матеріалів, компонентів та конструктивних параметрів робочих органів. Таке пресове обладнання має бути обладнане автоматизованими системами керування, які забезпечують можливість регулювання сили і тривалості удару.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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

1.1 Класифікація технологічних процесів у легкій промисловості, що базуються на застосуванні ударного впливу

У виробництві масових партій товарів, ключове значення має технологічний процес, який представляє собою оптимальну послідовність технологічних операцій з обробки та складання деталей і вузлів. Цей процес має бути економічно вигідним та забезпечувати високу якість готової продукції [8].

У легкій промисловості застосовуються різноманітні технологічні процеси для виробництва продукції. Проте, можна виділити певний набір операцій, які використовують зворотно-поступальний рух робочих органів, що призводить до спрямованого удару по оброблюваному матеріалу. Технологічні операції такого типу представлено у розробленій класифікації на рис. 1.1.

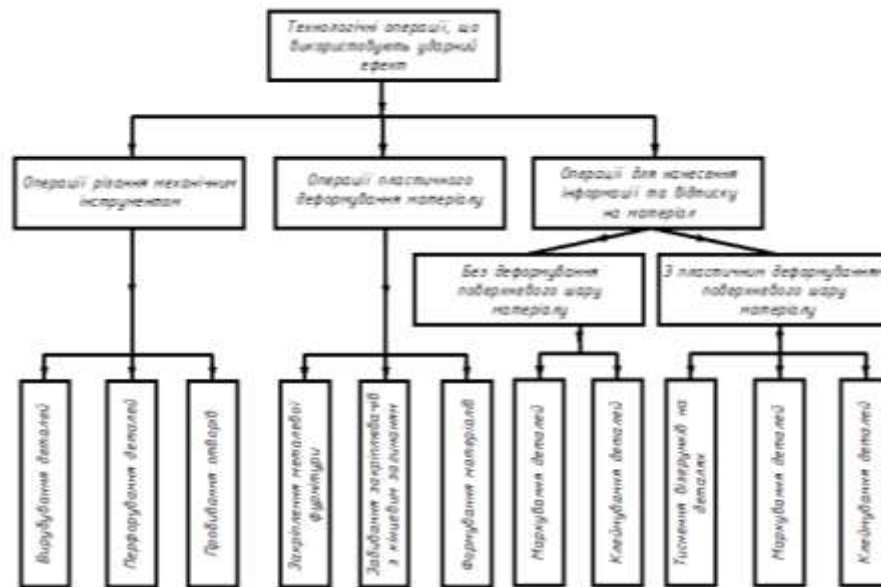


Рисунок 1.1 - Класифікація технологічних операцій легкої промисловості, що використовують ударний ефект

Для виконання таких операцій використовується різноманітне устаткування для вирубування, перфорування та пробивання отворів, маркування, клеймування та тиснення інше. Обладнання, яке використовує ударний метод, широко

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

застосовується в різних галузях промисловості і може бути реалізоване за допомогою механічних, електричних, пневматичних або гідравлічних машин ударної дії, кожна з яких має свої особливості в конструкції та параметрах [9].

Аналіз сучасного устаткування, яке використовується на підприємствах легкої промисловості, підкреслив необхідність та можливість подальшого вдосконалення технологічних ділянок розкрою та підготовки матеріалів шляхом впровадження швидкісних режимів роботи обладнання. Підвищення продуктивності та якості виробів також можливе через збільшення рівня автоматизації процесів виконання операцій. В класифікації технологічних операцій та при проектуванні обладнання ключовими характеристиками є технологічне зусилля.  $F_{техн}$  та характер його зміни і робота  $A_{техн}$ .

1.2 Пресове обладнання використовуване для виконання операцій легкої промисловості та характеристика приводів, що в ньому застосовуються

1.2.1 Пресове обладнання використовуване для виконання операцій вирубування, перфорування деталей одягу та взуття й пробивання отворів в матеріалах

Операцію вирубування в основному виконують на електрогідравлічних пресах, іноді – на електромеханічних (ексцентрикових). Вирубні преси з пневматичним приводом використовуються рідко, переважно для вирубування деталей невеликого розміру.

Кожен тип обладнання має свій спектр конструкцій: від простих пресів з ручним керуванням та подачею матеріалів до автоматизованих прес-автоматів з програмним управлінням і автоматичною подачею матеріалів. За призначенням вирубні преси поділяються на три категорії: для вирубування деталей з жорстких матеріалів, для вирубування деталей з м'яких матеріалів та для вирубування взуттєвих деталей із рулонних або листових матеріалів [12].

У сучасний час підприємства легкої промисловості можуть

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використовувати обладнання, яке було вироблене десятки років тому для виконання операцій вирубання. Проте, відбувається їх модернізація за допомогою устаткування від іноземних виробників. Основними постачальниками пресів закордонного виробництва є фірми «Atom» (Італія), «Compart» (Німеччина), «Schoen» (Німеччина), «Chiesa» (Італія), «Omac» (Італія), «Chenfeng» (Тайвань) тощо [16].

Аналіз технічних параметрів вказує на те, що пресове обладнання використовує різноманітні приводи, такі як електромеханічний, гідравлічний та, у деяких випадках, комбінований пневмо-гідравлічний. Для пресів з невеликим зусиллям вирубання рідко використовується пневматичний привід. Гідравлічний привід переважає серед інших типів приводів.

Перфорування проводиться на електрогідравлічних пресах. Крім того, на підприємствах легкої промисловості для цієї операції часто використовується застаріле обладнання. Основними постачальниками обладнання для перфорування деталей іноземного виробництва є компанії «Schoen» (Німеччина), «Svit» (Чехія), «Fustellificio Vico S.r.l.» (Італія), «Leibrock» (Німеччина), «Atom» (Італія) та інші [16]. Окрім пресового обладнання, для створення дрібних отворів у верху взуття часто використовують швейні машини з електромеханічним приводом, в яких голку замінюють на просічку. Щоб зменшити кількість кінематичних ланок в машині для перфорування, важливою задачею є розробка пристрою з двокоординатною системою переміщення та електромеханічним приводом для робочого органу.

При аналізі технічних характеристик виявлено, що для пресового обладнання для перфорування переважно використовується гідравлічний привід. Застосування електромеханічного приводу характерне лише для окремих моделей обладнання.

Пробивання отворів у швейній, взуттєвій та шкіряно-галантерейній промисловості зазвичай проводять для різних видів металевої фурнітури, деталей устілкового вузла, пасок тощо. Пробивання отворів для металевої фурнітури часто виконують на тому ж обладнанні, що і її встановлення. Для пробивання

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

отворів у деталях взуття та пасках зазвичай використовують обладнання з електромеханічним приводом від фірми "Banf" (Італія) [17], електрогідравлічним приводом від фірми "Omac" (Італія) або пневматичним приводом від фірми "Ares" (Італія) та інших [18].

1.2.2 Пресове устаткування призначене для виконання операцій, таких як маркування, клеймування й тиснення деталей та виробів

Зазвичай, на підприємствах загального машинобудування та легкої промисловості для проведення маркування часто використовується застаріле обладнання. Проте, відбувається його модернізація, внаслідок чого з'являються передові пристрої, які забезпечують якісне виконання маркувальних робіт різної складності. Устаткування для виконання маркування ударом найчастіше застосовується в загальному машинобудуванні. З його допомогою наносять маркування на деталі зі сталі, чавуну, бронзи, алюмінію, міді, скла, пластику та інших матеріалів.

Для маркування та клеймування деталей одягу і взуття з різних матеріалів зазвичай використовують машини фірм «Sigma» (Італія), «Busmk» (Англія), «Sicomex» (Італія) та інші. [19].

Це устаткування оснащене механічним, електромеханічним та пневматичним приводами, проте найбільш поширеними є механічний та пневматичний типи приводів.

Одним із найпопулярніших методів маркування є ударно-точковий. Під час аналізу технічних характеристик цього устаткування виявлено, що наразі використовуються два методи активації голок: за допомогою пневматичних пристроїв, які подають стиснене повітря до модулів обладнання для маркування, та за допомогою електричних магнітів. Використання приводу на основі електричних магнітів призводить до підвищення швидкодії та продуктивності устаткування в цілому, а також зменшення енерговитрат.

Зазвичай операцію тиснення деталей одягу, взуття та шкіряно-

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

галантерейних виробів виконують на тому ж устаткуванні, що і операцію перфорування. Для цього використовуються засоби від фірм, таких як «Schoen» (Німеччина), «Омас» (Італія), «Leibroek» (Німеччина), «Atom» (Італія) та інші [16].

Отже, для виконання операції тиснення деталей часто застосовують гідравлічний привід, але можна зустріти і пресове устаткування з електромеханічним приводом, що функціонує у квазістатичному й динамічному режимах роботи.

### 1.2.3 Структурний синтез пресового обладнання

Найбільшого поширення серед пресового обладнання зі зворотно-поступальним рухом робочих органів, яке використовується для виконання вищезгаданих технологічних операцій у легкій промисловості, набули ручні, електромеханічні, гідравлічні й пневматичні приводи [15].

Пресове обладнання для виконання цих операцій можна класифікувати залежно від типу енергії, що використовується в приводі, як показано на рис. 1.2.

Ручні інструменти та механічне обладнання зазвичай використовуються на невеликих швейних підприємствах, в ательє та ремонтних майстернях малої потужності. Таке устаткування переважно застосовується для встановлення металеві фурнітури в матеріал, пробивання отворів, маркування, клеймування та тиснення візерунків на матеріалах й виробках.

До переваг використання таких ручних інструментів належать: незалежність від електромережі, компактність, невеликі розміри та мала вага. Однак вони мають і недоліки, зокрема: неможливість створення великих зусиль, можливу втому працівника під час виконання операцій і обмежену сферу використання.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

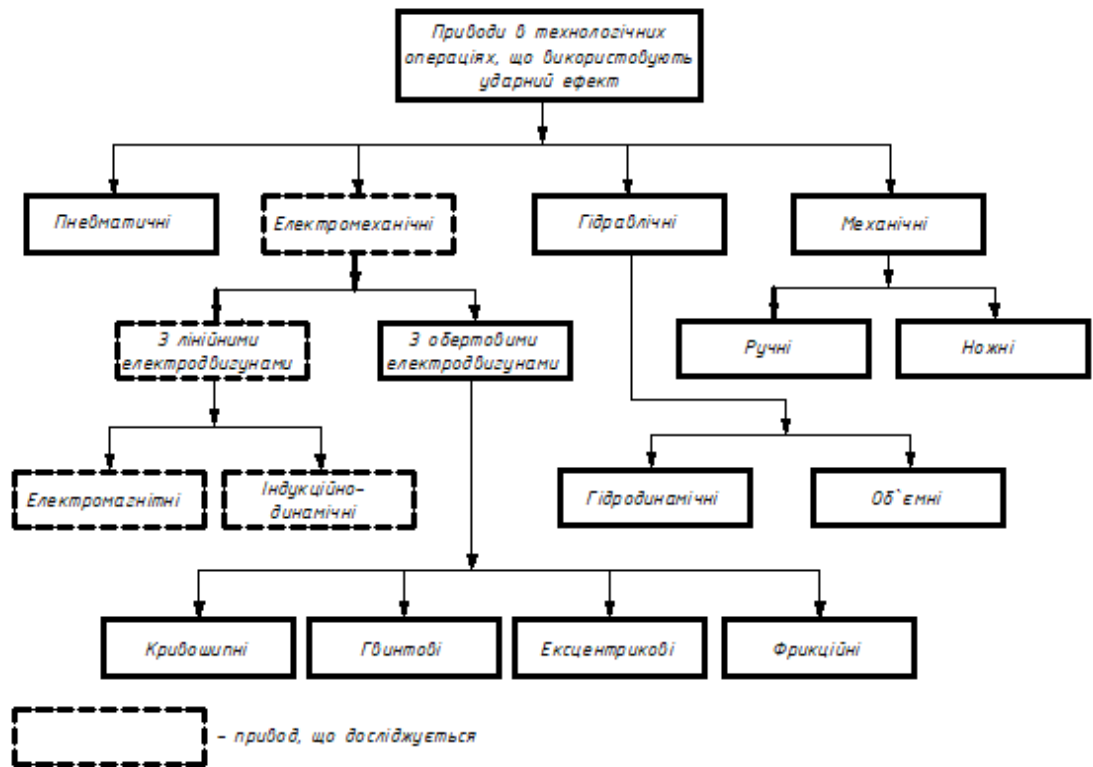


Рисунок 1.2 - Класифікація приводів для технологічних операцій, що застосовують ударний ефект

Механічне обладнання може мати ручний або ножний привід. Серед настільного механічного обладнання з ручним приводом для встановлення металевої фурнітури можна виділити обладнання важільного та гвинтового типу.

Обладнання з електромеханічним приводом може працювати за двома принципами: перетворення обертового руху ротора електродвигуна у зворотно-поступальний рух робочого органу за допомогою механічних передач або безпосереднє перетворення електричної енергії в кінетичну енергію прямолінійного руху робочого органу.

Обладнання з електромеханічним приводом має значні переваги порівняно з іншими типами приводів, включаючи високу швидкість, продуктивність та надійність. Однак воно також має ряд недоліків: не у всіх конструкціях пресів можна регулювати технологічне зусилля, потреба у частому змащуванні, не вигідний режим роботи двигуна зі змінним навантаженням, що призводить до низьких енергетичних показників. Також одним з основних недоліків є наявність

довгих кінематичних ланок з великою кількістю проміжних елементів, що добре ілюструє структурна схема такого приводу (рис. 1.3, аркуш [БРМА24.00.00.000ДО]) [20-23].

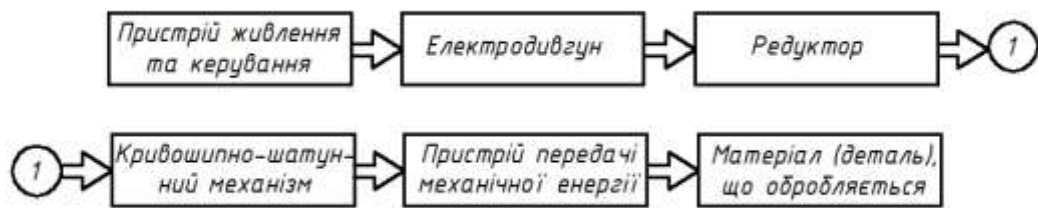


Рисунок 1.3 - Структурна схема електромеханічного (кривошипно-шатунного) пресу

Наявність довгих кінематичних ланок призводить до зношування обертових вузлів і підвищеного рівня шуму. Використання трифазних двигунів у деяких таких пресах унеможлиблює їх застосування на підприємствах без трифазної мережі.

Електромеханічне обладнання сьогодні є найпоширенішим для встановлення металевої фурнітури, виконання операцій маркування, клеймування, тиснення та забивання металевих закріплювачів.

Обладнання з лінійними електричними двигунами як привід має великі перспективи для виконання технологічних операцій з ударним ефектом. У такому обладнанні відбувається безпосереднє перетворення електричної енергії в механічну, що усуває необхідність у довгих кінематичних ланках, як показано на схемі приводу на рис.1.4 (аркуш [БРМА24.00.00.000ДО]).

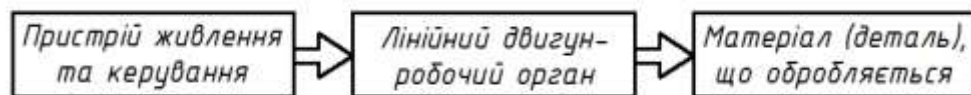


Рисунок 1.4 - Структурна схема пресу з приводом від лінійного електродвигуна

Станом на сьогодні українські підприємства використовують обладнання для встановлення металевої фурнітури, вироблене в Китаї та Туреччині. Основні недоліки такого обладнання включають великі габарити та громіздку

конструкцію, підвищені енерговитрати через неправильно підібраний тип лінійного електричного двигуна, а також системи живлення та керування, і високу чутливість до перепадів напруги в мережі.

Гідропривід у легкій промисловості застосовується в силових машинах зі зворотно-поступальним рухом робочих органів, які призначені для вирубування та перфорування деталей, тиснення візерунків на деталях та інших операцій, що вимагають великих технологічних зусиль.

Гідроприводи поділяються на два типи: гідродинамічні та об'ємні. Гідродинамічні приводи зазвичай використовують кінетичну енергію потоку рідини, тоді як об'ємні - потенційну енергію тиску робочої рідини [23].

Основні переваги гідравлічного приводу включають здатність створювати великі зусилля при відносно невеликих розмірах силових пристроїв, можливість отримання великих ходів (до кількох метрів) повзуна, плавний рух робочих органів машини, широкі можливості безступеневого регулювання швидкості, легкість управління режимами роботи приводу під час руху виконавчих механізмів, простоту включення, перемикавання та керування, реверсування, стандартність та типовість пристроїв, нечутливість до перевантажень і безшумність роботи [23].

Однак, гідравлічні приводи також мають деякі недоліки. Пресове обладнання має складну конструкцію, що показано на структурній схемі на рис.1.5 (аркуш [БРМА24.00.00.000ДО]).

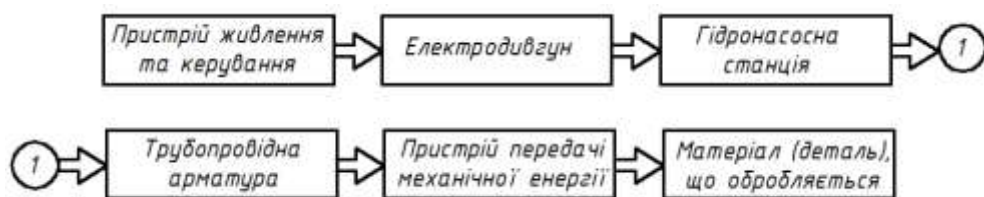


Рисунок 1.5 - Структурна схема гідравлічного пресу

Окрім того, гідравлічні приводи є дорогими у виготовленні та експлуатації, не забезпечують високих швидкостей руху робочого органу, що негативно впливає на їх продуктивність. Висока вартість обслуговування порівняно з

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пневматичними приводами пов'язана з необхідністю використання мінеральних олій як робочої рідини, які потребують періодичної заміни та ретельної герметизації через високі тиски [20-22].

На підприємствах легкої промисловості для встановлення металевої фурнітури, пробивання отворів у матеріалі, виконання операцій маркування, клеймування та тиснення також використовують обладнання з пневматичним приводом. Основні переваги такого обладнання включають високу швидкість спрацювання робочих органів, простоту управління та економічність завдяки технологічному живленню, надійність і довговічність, низький рівень шуму, здатність регулювати технологічні зусилля в широкому діапазоні залежно від операції та характеристик матеріалу і фурнітури [25].

Однак, пневматичні приводи також мають деякі недоліки. Пресове обладнання з пневматичними приводами має складну конструкцію, що показано на структурній схемі, зображеній на рис. 1.6 (аркуш [БРМА24.00.00.000ДО]) [20-22].

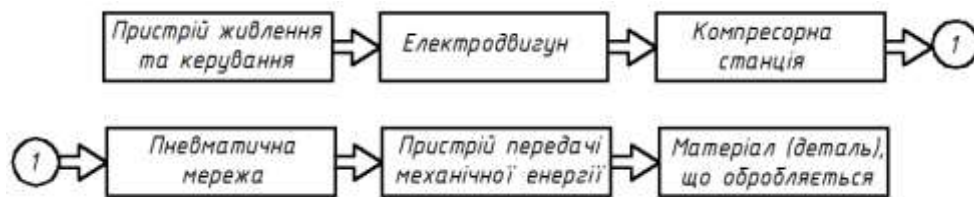


Рисунок 1.6 - Структурна схема пневматичного пресу

Недоліки також включають громіздкість пневмосистеми та можливість виникнення ударних навантажень, що вимагає встановлення спеціальних засобів для забезпечення плавності та точності руху робочих органів машини. В деяких випадках для роботи машини використовують автономний компресор, що є недоцільним для малих підприємств через додаткове споживання електроенергії та значні витрати на ремонт.

Продуктивність такого обладнання приблизно така ж, як і в обладнання з електромеханічним приводом.

Проаналізувавши технічні характеристики пресового обладнання для виконання розглянутих технологічних операцій, можна відзначити, що практично

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

немає обладнання, яке працює в статичному режимі. Найближчим до статичного режиму є механічне обладнання гвинтового типу з ручним приводом та деякі ручні інструменти, зокрема ручні прес-щипці. У квазістатичному режимі працює більшість обладнання з ручним та ножним приводами. У динамічному режимі працює обладнання з електромеханічним, гідравлічним та пневматичним приводами, а іноді й з ручним приводом.

Аналіз показує, що на підприємствах легкої промисловості найчастіше виконують такі операції на обладнанні, яке працює в динамічному режимі, рідше — в квазістатичному та статичному. Продуктивність виконання операцій на кожному з розглянутих видів обладнання є різною і залежить як від самого обладнання, так і від кваліфікації та продуктивності праці робітника.

Отже, проаналізувавши розглянуті технічні характеристики обладнання й технологічні операції, можна зробити висновки:

1. Хід робочого органу під час виконання розглянутих технологічних операцій становить від 20 до 150 мм. Зазор між робочими інструментами та ударником обладнання, зазвичай, потрібен лише для вільного розміщення матеріалу (деталі) під час операції. Наприклад, у механічних, електромеханічних та гідравлічних пресах надмірний хід робочого органу призводить до необґрунтованих витрат електроенергії та зниження продуктивності.

Пробивання отворів у матеріалі, маркування, тиснення чи клеймування не потребує значних технологічних зусиль (зусилля в межах  $0,5 \cdot 10^3 \dots 3 \cdot 10^3$  Н), на відміну від вирубування та перфорування деталей.

Розглянуті технологічні операції можуть виконуватися у різних режимах, поділ на які є умовним і, по суті, відображає діапазон швидкостей виконання.

Електромеханічні, гідравлічні та пневматичні приводи, широко використовувані в обладнанні для цих технологічних операцій, характеризуються багатоступеневим перетворенням первинної енергії (зазвичай електричної) в механічну енергію робочого органу. Загальним недоліком усіх цих приводів є те, що вони не відключаються, тобто споживають енергію під час холостих ходів органів машини, завантаження та розвантаження машини об'єктами обробки.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Наприклад, для операції вирубання деталей цей час становить від 70% до 90% всього виробничого часу.

У зв'язку з цим актуальним є створення пресового обладнання для виконання цих технологічних операцій на іншому енергетичному принципі – безпосередньому перетворенні електричної енергії в кінетичну енергію прямолінійного руху робочого органу, що можуть забезпечити лінійні електричні двигуни. Такий принцип починають реалізовувати в перших зразках електромагнітних пресів для встановлення металевої фурнітури китайські та турецькі виробники.

### 1.3 Порівняння показників існуючого пресового обладнання за системою об'єктивних критеріїв

Використовуючи різні критерії, порівняємо пресове обладнання з різними типами приводів. У дослідженні [21] автор на основі робіт попередників пропонує кількісні (абсолютні та питомі) показники для оцінки науково-технічного рівня пресових машин [20]. До абсолютних відносять: максимальне зусилля, що розвивається пресом  $F_{ел}$ ; максимальна величина робочого ходу повзуна пресу  $\delta_{як}$ ;

корисна робота за цикл  $A_{кор} = \int_0^{\delta_{як}} F_{ел}(x) dx$ ; енергія, що споживається за цикл  $W_{ен}$ ;

маса активних матеріалів пресу  $m_{ов}$  і маса машини  $m_m$ ; площа, яку займає прес,  $S_{пр}$ ;

частота ходів ударника в хвилину  $n_{ход}$ ; потужність електродвигуна  $P_{ел}$ .

Відносними показниками є: ефективний коефіцієнт корисної дії пресу

$n_{еф} = (A_{кор} / W_{ен}) \cdot 100\%$ ; питома сила тяги  $F_{ел}^* = F_{ел} / m_{ов}$ , кН/кг; коефіцієнт

відносної площі  $k_{пл} = S_{пр} / F_{ел.макс.}$ , м<sup>2</sup>/кН.

Через відсутність вичерпної інформації про характеристики пресового обладнання для легкої промисловості в технічній літературі, проведення об'єктивного порівняльного аналізу його показників виявилось складним завданням. Тому для порівняння характеристик пресового обладнання з різними

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

типами приводів, що застосовуються в різних галузях, було використано дані з досліджень, представлених у роботах [21, 22].

З метою досягнення об'єктивності автор роботи [21] проаналізував інформацію про більш ніж 200 типорозмірів пресів малої та середньої потужності з різних галузей промисловості, що міститься в монографіях, статтях, каталогах та рекламних проспектах.

Для оцінки технічного рівня обладнання дослідники [21, 22] використали систему загальноприйнятих критеріїв, представлених у таблиці 1.1, та адаптували її до обладнання з різними типами приводів.

Згідно з даними таблиці 1.1, пресове обладнання з ЛЕП значно відрізняється за значенням ефективного ККД від аналогів з іншими типами приводів. У електромеханічних пресах, де використовується маховик, це призводить до наявності енергетичного баласту в машині. Низький ККД гідравлічного та пневматичного пресового обладнання пояснюється тим, що в цих машинах холостий хід є підготовчим, а не призначений для накопичення енергії, а лише для переміщення робочого органу.

Таблиця 1.1 - Питомі технічні показники пресового обладнання

Показник	Діапазон зміни значень показника			
	Преси з гід-роприводом	Преси з еле-ктромехані-чним при-водом	Преси з пне-вматичним приводом	Преси з ЛЕД
Ефективний ККД, %	11 ... 15	8 ... 11	9 ... 15	25 ... 36
Питома сила тяги, кН/кг	0,04 ... 0,1	0,01 ... 0,25	0,01 ... 0,25	0,02 ... 1
Тягове зусилля, кН	$\geq 1300$	45	30	600
Робочий хід, м	$\geq 0,5$	0,07	$\geq 0,3$	2,0
Частота ходів, Гц	800	300	200	30000

Пресове обладнання з ЛЕП за питомим показником сили тяги значно випереджає гідравлічне та пневматичне.

Важливо зазначити, що можливості вдосконалення гідро- та пневмопресів

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

практично вичерпані. Тому застосування лінійних електричних двигунів для приводу пресового обладнання, як правило, є більш доцільним, ніж використання приводів іншої дії в аналогічному обладнанні [21].

#### 1.4 Шляхи модернізації пресового обладнання

На основі аналізу технологічних операцій та пресового обладнання для їх виконання було визначено ключові напрямки вдосконалення технологічного процесу та обладнання:

##### 1). Автоматизація та оптимізація:

- автоматизація технологічних процесів для економії ресурсів та підвищення ефективності;
- оптимізація використання матеріалів для мінімізації відходів;
- зменшення простоїв обладнання для кращого використання робочого часу;
- збільшення строку служби вирубного оснащення та робочих інструментів для зниження витрат на обслуговування;
- підвищення швидкості виконання технологічних операцій для збільшення продуктивності.

##### 2). Підвищення надійності та ефективності:

- впровадження коротких кінематичних, гідро- та пневмоланок для спрощення конструкції та зниження ризику поломок;
- використання зносостійких конструкційних матеріалів, покриттів та фізико-хімічних методів обробки поверхонь деталей машин для збільшення їх терміну служби.

##### 3). Енергоефективність:

- оптимізація роботи електричного двигуна за допомогою частотного керування для економії електроенергії;
- розробка та впровадження сучасних енергозберігаючих приводів, таких як лінійні електричні двигуни;
- використання енергоефективних компонентів та технологій.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4). Точне дозування сили удару:

- оснащення пресового обладнання системами з мікропроцесорним керуванням для регулювання сили та тривалості удару;
- розробка алгоритмів керування, що враховують властивості матеріалів, металевої фурнітури та конструктивні параметри робочих інструментів.

Впровадження цих напрямків вдосконалення пресового обладнання призведе до: підвищення продуктивності, збільшення надійності та довговічності обладнання, зниження енерговитрат, покращення якості виконання технологічних операцій, зниження витрат на обслуговування та ремонт.

Наступним кроком дослідження буде розробка пристрою з ЛЕД як приводом, призначеного для виконання розглянутих технологічних операцій.

### 1.5 Інноваційні імпульсні методи для ударних процесів у легкій промисловості

Енерго- та ресурсозбереження стає все більш актуальною проблемою для людства, стимулюючи розвиток нових прогресивних імпульсних методів обробки матеріалів та відповідного технологічного обладнання. Впровадження таких технологій в легкій промисловості, де використовуються операції з обробкою натуральних та штучних матеріалів для виготовлення одягу та взуття, є нагальною потребою. У багатьох випадках для реалізації цих технологічних процесів використовується ударне обладнання, що працює з механічною енергією різної сили, енергії та частоти. Імпульсні технології, такі як вибухові речовини, магніто-імпульсні та електророзрядні установки, ударні машини та інші пристрої ударної дії, можуть значно підвищити ефективність технологічних операцій. Принцип дії імпульсних технологій полягає в подачі до об'єкта обробки (матеріалу або робочого інструменту) окремих порцій енергії. Завдяки цьому можна різко збільшити густину енергії, що вводиться, оптимально керувати механічним процесом та отримувати ряд корисних ефектів. Імпульсне виконання операцій легкої промисловості може призвести до покращення чистоти зрізу,

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зменшення роботи різання, енерговитрат, підвищення продуктивності праці тощо.

Імпульсне обладнання, як правило, має ряд переваг порівняно з обладнанням, що працює в безперервному режимі, при рівній середній спожитій потужності: більш високі питомі енергетичні показники та менші габарити. Це пояснюється появою ряду специфічних ефектів, що супроводжують імпульсне підведення енергії, таких як збільшення імпульсної потужності, зміна сили та швидкості введення енергії в об'єм об'єкта.

Для удосконалення та створення нових імпульсних систем необхідно провести ряд теоретичних, експериментальних досліджень та розрахункових задач, адже механічна енергія відіграє ключову роль в імпульсних процесах і технологіях.

Імпульсну механічну дію на об'єкт обробки можна класифікувати за величиною енергії, сили (тиску) та частоти імпульсів.

За енергією: низькі ( $1 \dots 10$  Дж), малі ( $1 \dots 10^3$  Дж), середні ( $1 \dots 10^5$  Дж), високі (більше  $10^5$  Дж).

За силою (тиском): низькі (до 1 Н), малі (до 100 Н), середні (до 1000 Н), високі (більше 1000 Н).

За частотою: одиничні (один удар), низькочастотні (до 1 Гц), середньої частоти ( $1 \dots 50$  Гц), високочастотні (більше 50 Гц).

За характером дії: ударн, вібраційні та комбіновані (віброударні).

Будь-який технологічний процес має параметри, що визначають його кінцеві технічні та економічні характеристики, такі як продуктивність, питомі витрати енергії та матеріалів, собівартість готового виробу тощо.

Для імпульсного технологічного процесу основними вихідними параметрами є енергія та частота дії [22]. У багатьох випадках також важливо враховувати силу дії та форму силових імпульсів. Технологічні вимоги до імпульсного виконання процесів легкої промисловості наведені в табл. 1.2 у вигляді діапазонів механічної енергії та частоти дії [20, 22]. Саме ці параметри суттєво впливають на перебіг імпульсного технологічного процесу та визначають його ефективність.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розглянуті технологічні операції використовують ударний ефект. З урахуванням характеру дії на об'єкт обробки, електромеханічний перетворювач енергії можна сформувати як силову електромеханічну ударну систему для пресового обладнання легкої промисловості.

Таблиця 1.2 - Параметри імпульсних технологічних процесів легкої промисловості

№ п/п	Технологічна операція легкої промисловості	Діапазони параметрів	
		Енергія дії, Дж	Частота дії, Гц
1	Вирубання та перфорування деталей, пробивання	20 ... 150	1 ... 15
2	Пробивання отворів в матеріалі	3 ... 40	1 ... 10
3	Закріплення металевої фурнітури	3 ... 40	1 ... 10
4	Клеймування, маркування, тиснення на деталях та виробках	2 ... 60	1 ... 50
5	Забивання закріплювачів	1 ... 8	1 ... 50
6	Формування матеріалів	1 ... 50	1 ... 50

### 1.6 Інноваційний привод з ЛЕД для імпульсних технологій

Основні показники приводу, такі як питомі енергетичні показники та вартість, зазвичай визначаються з урахуванням силових параметрів технологічних операцій, що виконуються.

На відміну від електродвигунів обертової дії, які здійснюють безперервний обертовий рух з постійним обміном енергії між електричною та механічною системами, лінійні електричні двигуни (ЛЕД) генерують поступальне або зворотно-поступальне переміщення за рахунок дискретного перетворення енергії.

Переваги ЛЕД-приводів полягають у відсутності проміжної трансформації механічної енергії, простоті та економічності регулювання величини зусилля.

Однак, ЛЕД поступаються електродвигунам обертової дії за коефіцієнтом

корисної дії (ККД) та коефіцієнтом потужності.

Важливо зазначити, що при механізації та автоматизації ключовим фактором стає можливість виконання конкретного технологічного процесу з заданими параметрами.

В цьому аспекті ЛЕД-системи вигідно відрізняються від окремих двигунів обертового руху, адже демонструють кращі показники використання активних матеріалів (35...50 кг/кВт проти 0,5...1,5 кг/кВт) та відсутність вагового й енергетичного баласту.

За принципом дії ЛЕД поділяються на такі основні типи: індукційні (ЛІД), електродинамічні (ЛЕДД), магнітоелектричні (ЛМЕД), магнітострикційні (ЛМСД), електрострикційні (ЛЕСД), індукційно-динамічні (ЛІДД), електромагнітні (ЛЕМД).

Основними параметрами ЛЕД є: зусилля, що створює двигун, амплітуда динамічного переміщення, частота ходів, ККД, питома корисна потужність, питома сила тяги.

Граничні параметри ЛЕД наведені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 - Орієнтовні граничні показники ЛЕД

Тип ЛЕД	Параметр ЛЕД				
	Тягове зусилля, Н	Переміщення, м	Частота ходів, Гц	Питома корисна потужність, Вт/кг	Питома сила тяги, Н/кг
Індукційний	$7 \cdot 10^4$	не обм.	200	4	8
Електродинамічний	$45 \cdot 10^4$	0,3	$15 \cdot 10^3$	5	20
Магнітоелектричний	$10^3$	$3 \cdot 10^{-2}$	$15 \cdot 10$	3	1
Магнітострикційний	$60 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^4$	0,5	50
Електрострикційний	$10^2$	$10^{-2}$	$15 \cdot 10^3$	$10^2$	$5 \cdot 10^2$
Індукційно-динамічний	$15 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^{-2}$	60	85	$4 \cdot 10^3$
Електромагнітний	$15 \cdot 10^4$	2	600	50	$3 \cdot 10^3$

Індукційні двигуни зворотно-поступальної дії мають складну конструкцію та значні габарити, а також низьку питому силу тяги. Через ці недоліки, а також складність керування та неможливість створення надійних ударних машин, їх застосування обмежене. Лінійні електродинамічні двигуни не знайшли широкого використання через недостатню міцність та надійність електричної частини якоря при ударно-циклічному режимі роботи, а також низький ККД.

Використання магнітоелектричних двигунів (МЕД) як машин ударної дії наразі є проблематичним з кількох причин. По-перше, дефіцитність сплавів для постійних магнітів, що робить МЕД дорогими та складними у виробництві. По-друге, низька питома потужність: МЕД не генерують багато потужності на одиницю маси або об'єму. По-третє, низька надійність: МЕД можуть бути нестійкими до ударів та вібрацій. По-четверте, складність схеми живлення: Для роботи МЕД потрібні спеціальні генератори, що робить їх більш громіздкими та дорогими.

Незважаючи на ці недоліки, МЕД мають потенціал для використання в майбутньому: висока магнітна енергія (сучасні постійні магніти зроблені з сплавів самарій-кобальт та неодим-залізо-бор, які мають значно вищу магнітну енергію, ніж електромагніти), розвиток ударостійких магнітів (нові технології дозволяють створювати магніти, які більш стійкі до ударів та вібрацій).

Лінійні магнітострикційні двигуни (ЛМСД) не знайшли широкого застосування в ударних машинах через: малі переміщення (ЛМСД генерують невеликі переміщення, що робить їх непрактичними для багатьох ударних операцій) та низьку питому корисну роботу (ЛМСД не генерують багато корисної роботи на одиницю маси або об'єму).

Лінійні електрострикційні двигуни (ЛЕСД) також не знайшли широкого застосування через: недостатню динамічну міцність якоря (ЛЕСД не витримують значних ударних навантажень) та невеликі тягові сили (ЛЕСД генерують невеликі тягові сили, що робить їх непрактичними для багатьох ударних операцій).

Лінійні індукційно-динамічні двигуни (ЛІДД) поєднують в собі переваги електродинамічних та електромагнітних двигунів: висока швидкодія (ЛІДД

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

генерують високу швидкість руху) та високі питомі показники (ЛІДД мають високу питому потужність та ККД).

Однак ЛІДД мають і свої недоліки: висока вартість елементної бази джерел живлення (ЛІДД потребують дорогих джерел живлення) та обмеженість застосування в пресовому обладнанні (ЛІДД не підходять для низькошвидкісних режимів роботи).

Лінійні електромагнітні двигуни (ЛЕМД) вважаються найперспективнішими для використання в ударних машинах: пряма передача енергії (ЛЕМД передають енергію безпосередньо матеріалу або робочому інструменту); високі питомі показники (ЛЕМД мають високу питому потужність та ККД); можливість регулювання (ЛЕМД дозволяють регулювати величину зусилля та частоту ходів); екологічно чиста енергія (ЛЕМД використовують електричну енергію, яка є екологічно чистою); автоматизація (ЛЕМД легко піддаються автоматизації); легкість керування (ЛЕМД прості в керуванні); захист від перевантажень (ЛЕМД неможливо перевантажити під час роботи).

Проведені дослідження показали, що ЛЕМД найкраще підходять для використання в ударних машинах.

Незважаючи на переваги ЛЕМД, їх використання в обладнанні легкої промисловості залишається незначним. Це пов'язано з: відсутністю серійного випуску ЛЕМД з високими питомими показниками (ЛЕМД з високими питомими показниками не випускаються серійно, що робить їх дорогими) та відсутність системного підходу до розробки обладнання з лінійними електричними двигунами (ЛЕД) гальмувала їх широке впровадження у виробництво.

Це призвело до створення непрактичних, громіздких та малоефективних конструкцій. Такі конструкції мали низьку продуктивність та надійність через надмірне нагрівання двигунів.

Ще одним недоліком ЛЕД-пристроїв є їх низький коефіцієнт корисної дії (ККД), який зазвичай знаходиться в діапазоні 10-35%. Низький ККД зумовлений втратами електроенергії, що споживається двигуном з мережі під час її перетворення в механічну роботу. Ці втрати мають різну природу. Електричні та

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

магнітні втрати: пов'язані з дією струму в електричному колі та магнітного потоку в магнітному колі та немагнітних металевих елементах конструкції двигуна. Втрати на активних опорах: в першу чергу, це втрати в міді обмоток двигуна. Втрати від вихрових струмів та гістерезису: пов'язані з перемагнічуванням сталевих елементів конструкції двигуна.

Для подолання цих проблем необхідні: цілеспрямовані дослідження спрямовані на розробку нових конструкцій ЛЕД-пристроїв з високим ККД та надійністю; розробка чітких рекомендацій щодо проектування та експлуатації ЛЕД-пристроїв, випуск серійних ЛЕД-двигунів з високими питомими показниками.

Це дозволить створити ефективне та надійне обладнання з ЛЕД, яке знайде широке застосування у різних галузях промисловості.

## 1.7 Висновки до першого розділу

Після дослідження методів, способів та інструментів обробки матеріалів легкої промисловості за допомогою електромеханічного пресового обладнання було зроблено такі висновки:

1). У легкій промисловості існує багато технологічних операцій, які виконуються на пресовому обладнанні зі зворотно-поступальним рухом робочих органів. При цьому може використовуватися ударний ефект. Важливими характеристиками цих операцій та ключовими параметрами при проектуванні обладнання є технологічне зусилля ( $F_{\text{техн}}$ ) та його зміна під час занурення робочого інструменту в об'єкт обробки, а також робота ( $A_{\text{техн}}$ ), необхідна для виконання технологічної операції.

2). У пресовому обладнанні зі зворотно-поступальним рухом робочих органів, яке використовується для виконання цих технологічних операцій легкої промисловості, найбільш поширеними є електромеханічні, гідравлічні та пневматичні приводи. Найбільш перспективним серед них може бути електропривод, адже електрична енергія є найбільш доступним і легко

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

трансформованим видом енергії. На основі проведеного огляду обладнання була створена класифікація приводів для технологічних операцій, що використовують ударний ефект. У цій класифікації, крім приводів з електродвигунами обертової дії, були виділені приводи з лінійними електродвигунами, які належать до класу електромеханічних приводів. Лінійні електродвигуни є найпростішими в експлуатації, найекономічнішими за енергоспоживанням та мають найвищі питомі енергетичні показники.

3). При виконанні цих технологічних операцій може використовуватися ударний ефект. Зважаючи на характер дії на об'єкт обробки, електромеханічний перетворювач енергії для пресового обладнання легкої промисловості можна сформулювати як силову електромеханічну ударну систему. До вихідних параметрів імпульсного технологічного процесу відносяться енергія та частота дії.

На основі проведеного аналізу технічних характеристик технологічних операцій та різних типів лінійних електродвигунів було обрано лінійний електромагнітний двигун як силову електромеханічну ударну систему пресового обладнання легкої промисловості.

Цей тип двигуна найкраще відповідає технічним та технологічним характеристикам розглянутих операцій та відрізняється від інших типів ЛЕД найвищими питомими енергетичними показниками.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2 РОЗРОБКА ПРИСТРОЮ З ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПРИВОДОМ ДЛЯ УДАРНОГО МАРКУВАННЯ ТА ПЕРФОРАЦІЇ ДЕТАЛЕЙ

### 2.1 Структура силової електромеханічної ударної системи для пресового устаткування

Технологічні операції легкої промисловості, для виконання яких використовуються ЛЕД, потребують окремого обґрунтування типу магнітної системи двигуна, схеми живлення та керування. Все пресове обладнання з силовими електромеханічними ударними системами, незалежно від конструкції, можна розглядати як комплекс, що складається з технологічного та енергетичного устаткування.

Структурну схему СЕМУС зображено на рис. 2.1. Схема ілюструє роль і місце кожного структурного елементу силової електромеханічної ударної системи пресового обладнання. Передача енергії між елементами відбувається в напрямку, показаному стрілками. Першою ланкою структурної схеми є ділянка електричної мережі, яка є першим елементом енергетичного каналу для підведення електричної енергії до пресового обладнання. Параметри електричної мережі впливають на характеристики напруги живлення СЕМУС і на режим роботи наступних елементів силового каналу [7].

При живленні електромеханічного пресового обладнання від мережі висуваються жорсткі вимоги: витримувати значні імпульси струму та допускати велику величину високочастотних складових. При роботі обладнання великої потужності або при живленні від недостатньо потужної мережі виникає питання якості електричної енергії через коливання напруги, викликане включенням СЕМУС [7].

Перетворювач енергії (ПЕ) трансформує електричну енергію з мережі з одними параметрами в електричну енергію з іншими параметрами, необхідну для живлення СЕМУС.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

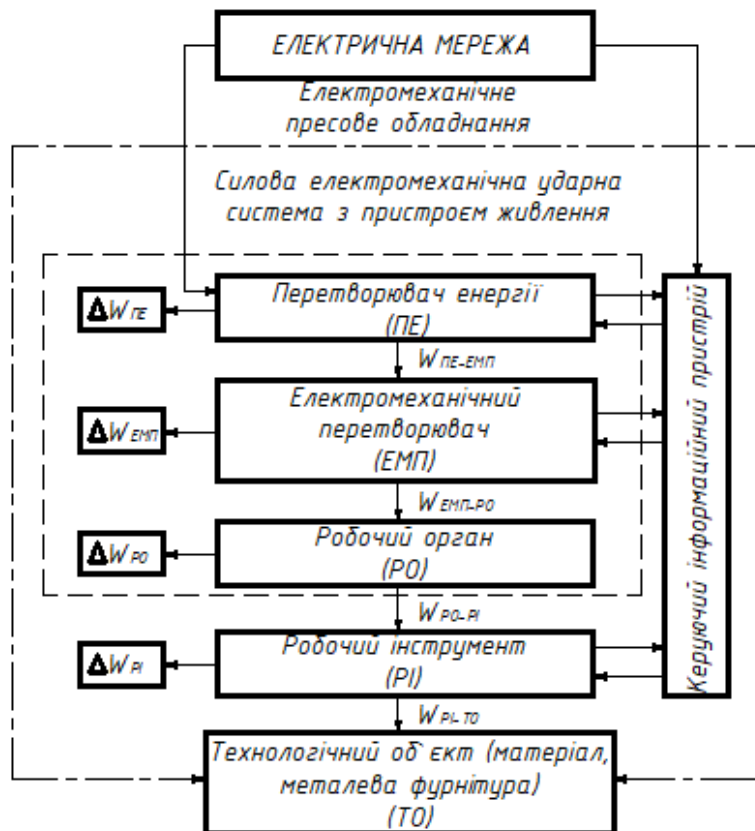


Рисунок 2.1 - Структурна схема енергетичних зв'язків силової електромеханічної ударної системи пресового обладнання легкої промисловості

Система керування електромеханічним пресовим обладнанням з лінійним електричним двигуном (ЛЕД) включає в себе кілька ключових компонентів.

Накопичувач енергії (НЕ). Використовується для зберігання енергії, яка потім перетворюється в механічну роботу ЛЕД. Найбільш підходящим типом НЕ для живлення ЛЕД в даному випадку є ємнісний накопичувач, який складається з імпульсних конденсаторів.

Магнітний накопичувач енергії (МНЕ). Цей компонент може бути двох типів: інтегрований з ЛЕД або автономний у вигляді пристроїв утримання якоря. МНЕ накопичує магнітну енергію в індуктивності ЛЕД, коли його якорі нерухомий.

Регулювання сили удару. Регулювання енергії, що акумулюється в ємнісному НЕ, дозволяє точно дозувати силу удару. Це може бути досягнуто двома способами: підбором ємності конденсаторів або регулюванням напруги

заряду конденсатора.

Ємнісний накопичувач енергії (ЄНЕ). Завдяки ЄНЕ можна уникнути впливу на мережу живлення великих імпульсів струму, а також забезпечити режим форсованого акумулювання енергії.

Електромеханічний перетворювач (ЕМП). Цей компонент перетворює електричну енергію з ЄНЕ в механічну роботу. ЕМП складається з активних опорів, індуктивностей та інших елементів.

Лінійний електричний двигун (ЛЕД). ЛЕД є основним виконавчим механізмом системи. Він генерує механічний рух, необхідний для виконання технологічних операцій.

Робочий орган (РО). РО, зазвичай, є якорем ЛЕД, який передає механічну енергію робочому інструменту (РІ) та технологічному об'єкту (ТО).

Схема живлення і керування. Ця схема забезпечує живлення ЛЕД, регулює силу удару та контролює роботу всієї системи.

Важливі аспекти проектування силової електромеханічної ударної системи: Комплексний підхід (розробка ЛЕД, ЄНЕ та схеми живлення і керування повинна здійснюватися одночасно); енергоефективність (схема живлення з ЄНЕ повинна бути енергоефективною, надійною та малогабаритною); підбір магнітної системи ЛЕД (магнітна система ЛЕД повинна відповідати характеристикам технологічних операцій, для яких використовується обладнання); режим роботи: (режим роботи системи (ударний або квазістатичний) повинен підбиратися для кожної операції індивідуально).

Переваги використання силових електромеханічних ударних систем: регулювання сили удару (можливість точно дозувати силу удару робить цю систему універсальною для різних технологічних операцій); енергоефективність (ЄНЕ дозволяє економити енергію та зменшувати вплив на мережу живлення); надійність (системи з ЛЕД мають високу надійність та довговічність); малогабаритність (системи з ЛЕД компактні та займають мало місця).

Використання силових електромеханічних ударних систем з ЛЕД може значно підвищити ефективність та продуктивність пресового обладнання, яке

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

використовується для виконання технологічних операцій легкої промисловості.

## 2.2 Енергетична структура силової електромеханічної ударної системи

Електричні машини - Це перетворювачі енергії, що поєднують електричні та механічні системи. Зв'язок між цими системами здійснюється за допомогою електромагнітного поля. Магнітне поле створює взаємодію між електричною та механічною системами. Це призводить до виникнення електрорушійної сили (ЕРС) в електричній системі та електромагнітної сили ( $F_{ел}$ ) в магнітному полі.  $F_{ел}$ , у свою чергу, діє на механічну систему, забезпечуючи перетворення енергії.

Імпульсні лінійні електричні двигуни (ЛЕД) - це двоступеневі електромеханічні перетворювачі електромагнітного типу циклічної дії [22].

Структурно їх можна розділити на три підсистеми: електричну, магнітну та механічну. Магнітна система є центральною в структурі ЛЕД. За час робочого циклу ЛЕД відбувається два перетворення енергії: електромагнітне (між електричною та магнітною підсистемами) та електромеханічне (між магнітною та механічною підсистемами).

Процес електромеханічного перетворення підпорядковується закону збереження енергії. Згідно з цим законом кількість енергії, що надходить в електричну машину від електричної  $dW_{ел}$  та механічної  $dW_{мех}$  систем, використовується на зміну енергії її магнітного поля  $dW_{магн}$  та на втрати, що виникають під час процесу перетворення енергії.

Баланс корисного перетворення енергії в лінійному електричному двигуні, без урахування втрат, описується рівнянням:

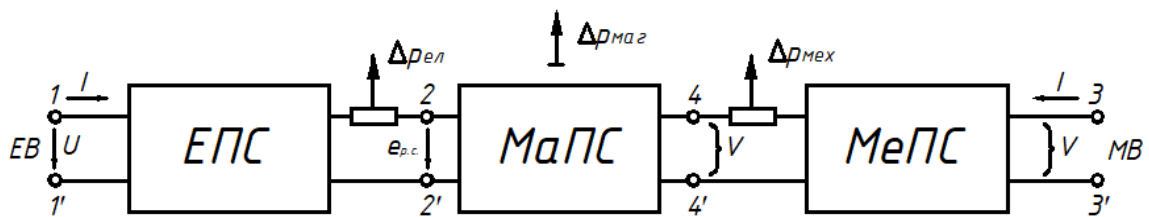
$$dW_{ел} - dW_{мех} = dW_{магн} \cdot \quad (2.1)$$

З цього рівняння видно, що процес перетворення енергії в ЛЕД відбувається завдяки безперервній зміні енергії магнітного поля, спричиненій енергією електричної системи.

У низці досліджень були представлені структурні схеми електромеханічних пристроїв [22]. На їх основі була розроблена узагальнена схема

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електромеханічного перетворювача (лінійного електричного двигуна) для пресового обладнання легкої промисловості. (рис. 2.2, аркуш [БРМА24.00.00.000ДО]).



- 11' – електричний вхід; 22' – електричний вхід магнітного поля;
- 33' – механічний вхід (якір перетворювача в зворотно-поступальний рух);
- 44' – механічний вхід магнітного поля зв'язку

Рисунок 2.2 - Функціональна схема електромеханічного перетворювача

Електромеханічний перетворювач складається з трьох взаємопов'язаних підсистем: електричної, магнітної та механічної. Енергія перетворюється з електричної форми в механічну, проходячи через три підсистеми: ЕПС, МаПС та МеПС. Два входи, ЕВ та МВ, дозволяють керувати роботою перетворювача та впливати на його механічний вихід.

Електромеханічний перетворювач піддається втратам енергії у вигляді тепла через електричні втрати, втрати в магнітопроводі та механічне тертя.  $\Delta p_{ел}$ ,  $\Delta p_{маг}$  і  $\Delta p_{мех}$  [22].

Для опису роботи електромеханічного перетворювача використовуються рівняння Кірхгофа та принцип Даламбера, які враховують сили електромагнітного походження.

Вхідні параметри перетворювача включають напругу  $U$ , струм  $I$ , електрорушійну силу  $e_{p.c.}$ , швидкість  $V$  та силу електромагнітного походження  $F_{ел}$ , а вихідними параметрами є характеристики механічного руху.

## 2.3 Порівняльний аналіз типів лінійних електричних двигунів

### 2.3.1 Дослідження, що проводяться в напрямку створення лінійних електричних двигунів

У переважній більшості науковці розглядають ЛЕД без зв'язку з конкретним технологічним навантаженням [22, 29]. Але, як правило, необхідно проектувати лінійний електричний двигун з іншими вузлами, елементами приводу для кожної конкретної задачі. Індивідуальний підхід до проектування приводів на основі ЛЕД: ключ до ефективності.

Таким чином, ЛЕД в пресовому обладнанні - це науковий прорив та інноваційні можливості. ЛЕД стануть ключовим компонентом пресового обладнання майбутнього, суттєво покращивши його характеристики та продуктивність.

### 2.3.2 Критерії оцінювання і порівняння систем лінійних електричних двигунів

Важливо спочатку проаналізувати критерії оцінки та порівняння різних магнітних систем лінійних електричних двигунів (ЛЕД), зокрема ЛЕМД та ЛІД, для їх застосування в ударних операціях легкої промисловості.

Багато конструкцій ЛЕД потребують ретельного підбору та оптимізації силової електромеханічної ударної системи, що використовується в приводі пресового обладнання. Для цього необхідно вибрати оптимальний тип магнітної системи ЛЕД, що підтверджується відповідними техніко-економічними показниками, які слугують основними критеріями оцінювання. Ці критерії визначаються вимогами до ЛЕД, які висуваються з боку розглянутих операцій легкої промисловості.

Основні критерії оцінювання: питома сила тяги лінійного електричного двигуна [7, 19, 21]; вид тягової характеристики лінійного електричного двигуна

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$F_{ел} = f(\delta_{як})$ ; номінальний робочий хід  $\delta_{як}$ ; режим роботи.

Завдяки цим критеріям можна чітко визначити тип магнітної системи ЛЕД, який найкраще відповідатиме всім особливостям розглянутих технологічних операцій. Важливо також врахувати форму тягової характеристики двигуна в приводі пресового обладнання, адже вона дає комплексне уявлення про його магнітну систему.

### 2.3.3 Оцінка придатності лінійного електромагнітного двигуна для застосування в легкій промисловості

Ключові характеристики двигуна, що визначають його функціональність та сферу застосування є величина робочого ходу  $\delta_{р.я}$  та тягові характеристики  $F_{ел} = f(\delta_{як})$ . Саме від цих параметрів залежить можливість реалізації необхідного закону руху робочого органу машини. В роботі [30] запропоновано класифікацію ЛЕД, засновану на цих та пов'язаних з ними параметрах. Автори ґрунтувалися на властивостях двигуна як перетворювача енергії, адже ігнорування цього аспекту може призвести до помилок при виборі двигуна та не оптимального режиму роботи приводу.

Сила тяги однообмоткового ненасиченого ЛЕМД описується наступним виразом [30]:

$$F_{ел} = \frac{\mu \cdot S \cdot w^2 \cdot I^2}{2} \cdot \frac{d(1/\delta_{як})}{dx}, \quad (2.2)$$

де  $I$  – струм, який протікає через обмотку, А;  $\mu$  – магнітна проникливість робочого зазору, Г/м;  $S$  – площа робочого зазору, м<sup>2</sup>;  $w$  – кількість витків;  $x$  – координата, яка характеризує положення якоря, м.

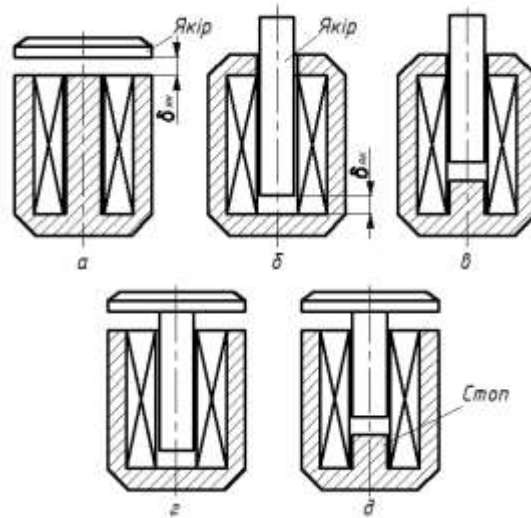
Згідно з формулою (2.2) індуктивність залежить від чотирьох параметрів: магнітна проникливість; площа й довжина робочого зазору; кількість витків, створюють магнітний потік. Теоретично, змінюючи один або декілька цих параметрів, можна отримати 15 типів двигунів:  $\delta$ ,  $S$ ,  $w$ ,  $\mu$ ,  $wS$ ,  $S\mu$ ,  $w\mu$ ,  $\delta S\mu$ ,  $\delta Sw$ ,

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$\delta S$ ,  $\delta w$ ,  $\delta \mu$ ,  $\delta w \mu$ ,  $S w \mu$ ,  $\delta S w \mu$ . Однак, не всі з цих 15 типів ЛЕМД знайшли практичне застосування.

Найбільш поширеними для виконання технологічних операцій в різних галузях промисловості є двигуни  $\delta$ -типу. Ці двигуни  $\delta$ -типу можуть мати різні конструкції [20]. На рис. 2.3 (аркуш [БРМА24.00.00.000ДО]) представлено основні конструкції таких двигунів. В деяких роботах двигуни такого типу називають короткоходовим.

Результати експериментальних досліджень статичних тягових характеристик ЛЕМД  $\delta$ -типу циліндричної структури представлено в роботі [20]. Статичні тягові характеристики цих двигунів представлено на рис. 2.4. Тягове зусилля в цьому випадку  $F_{ел}$  ЛЕМД  $\delta$ -типу буде залежати від зміни величини робочого зазору зі змінною  $x$ .



а – з якорем, що притягується;

б – з якорем, що втягується без стопа; в – з якорем, що втягується зі стопом;

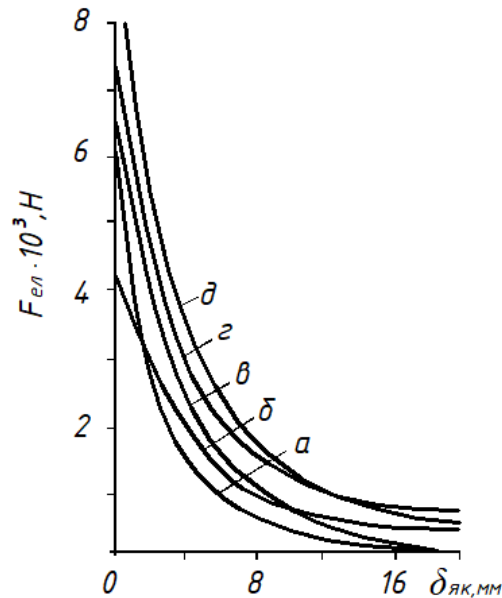
г – з комбінованим якорем без стопа; д – з комбінованим якорем і стопом

Рисунок 2.3 - Конструкції двигунів  $\delta$ -типу

Отже, аналіз показав, що тягові характеристики розглянутих типів ЛЕМД (рис. 2.4, аркуш [БРМА24.00.00.000ДО]) схожі за характером наростання зусилля. У кінці ходу робочого органу двигуна тяга зростає в усіх ЛЕМД цього типу, але темпи зростання різняться. У деяких ЛЕМД тяга зростає плавно. В інших – різко.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Відмінності спостерігаються лише у величині початкового та кінцевого тягових зусиль. Найменше початкове тягове зусилля мають ЛЕМД з якорем, що притягується або втягується зі стопом (рис. 2.4, а, в) [7]. У таких конструкціях воно майже дорівнює нулю. Всі інші типи ЛЕМД мають початкову силу тяги. Величина початкового тягового зусилля важлива при виконанні технологічних операцій в квазістатичному режимі.



а – з якорем, що притягується; б – з якорем, що втягується без стопа;

в – з якорем, що втягується зі стопом; г – з комбінованим якорем без стопа;

д – з комбінованим якорем і стопом

Рисунок 2.4 - Тягові характеристики ЛЕМД  $\delta$ -типу

Існує два способи забезпечити початкову силу тяги в ЛЕМД:

1) Зміна геометрії окремих елементів магнітної системи. Цей метод дозволяє сформувати потрібну тягову характеристику двигуна, яка відповідає технологічним вимогам за тяговою силою при виконанні операцій легкої промисловості як в квазістатичному, так і ударному режимах.

2) Використання автономного магнітного накопичувача для утримання якоря двигуна. Завдяки попередньому акумулюванню магнітної енергії в індуктивностях магнітної системи при нерухомому якорі можна значно збільшити початкове тягове зусилля.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Важливо підібрати відповідний тип ЛЕМД для кожної з розглянутих технологічних операцій (пункт 1.2), адже вони мають різні характери зміни технологічного зусилля. Згідно з рис. 1.3б, г, 1.4в, 1.5б, 1.6б, 1.7б, 1.8в, г, максимальні технологічні зусилля повинні виникати в кінці ходу робочого органу пресового обладнання.

Проведений аналіз тягових характеристик ЛЕМД різних типів показав, що для силових електромеханічних ударних систем пресового обладнання перспективно використовувати циліндричні ЛЕМД d-типу практично всіх конструкцій. Ці двигуни прості та технологічні у виготовленні. Хоча ЛЕМД d-типу з комбінованим якорем та стопом мають кращі тягові характеристики, інші типи ЛЕМД d-типу переважають за енергетичними показниками, а саме за величинами інтегральної роботи та кінцевого тягового зусилля. Лінійні електромагнітні двигуни широко використовуються в різних галузях промисловості, особливо в машинобудуванні та електротехніці. Їх застосовують для виконання широкого спектру різноманітних операцій: штампування, різання, вирубування, витягування, пробивання, клеймування, формування, запресовування (сальників, кілець тощо).

Таким чином, ЛЕМД, зокрема d-типу, можуть бути ефективно використані як силові електромеханічні ударні системи пресового обладнання для виконання розглянутих технологічних операцій легкої промисловості.

#### 2.4 Проектування систем живлення та керування силовими електромеханічними ударними приводами в пресовому обладнанні легкої промисловості

Вибір силової схеми та алгоритму керування перетворювачем є ключовими етапами при проектуванні електромеханічного пресового обладнання для легкої промисловості. При виборі силової схеми враховуються як технічні, так і економічні вимоги до такого обладнання з боку споживачів електричної енергії. Це можуть бути вимоги щодо якості енергії та її економії під час експлуатації. На

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

етапі виготовлення дослідного зразка та комплектуючих важливо раціонально підбирати активні матеріали, адже саме вони несуть основні енерговитрати [7]. Силові електромеханічні ударні системи для легкої промисловості, які живляться від ємнісних накопичувачів енергії, відрізняються від звичайних споживачів тим, що накопичують енергію з мережі та використовують її під час виконання технологічного процесу. Для пресового обладнання, що використовує силові електромеханічні системи ударної дії, необхідна схема живлення, яка: перетворює та передає енергію джерела живлення в ємнісний накопичувач енергії; за командою оператора розряджає накопичувач на обмотку збудження лінійного електричного двигуна.

Як вже зазначалося, виконання технологічних операцій легкої промисловості, що використовують ударний ефект, потребує дозування енергії удару. Тому в схемах живлення та керування повинна бути вбудована схема регулювання енергії заряду.

В пристроях живлення з ємнісним накопичувачем енергії, що зберігається в батареї конденсаторів ( $W$ ), залежить від її ємності ( $C_{\epsilon.n.e.}$ ) та напруги живлення ( $U'_{\epsilon.n.e.}$ ). Ефективність роботи такого блоку повністю розкривається лише за умови узгодження процесу розряду конденсаторної батареї з динамічними процесами в лінійному електричному двигуні. Цей режим вважається узгодженим, якщо для фізичної моделі значення енергії ( $W$ ), а також параметри  $C_{\epsilon.n.e.}$  та  $U'_{\epsilon.n.e.}$  підібрані таким чином, щоб протягом одного циклу роботи (від спрацьовування до зупинки якоря) ємнісний накопичувач енергії повністю розряджався, забезпечуючи при цьому максимальні вихідні показники силової електромеханічної ударної системи [31].

Системи живлення та керування лінійними електричними двигунами в приводах пресового обладнання легкої промисловості повинні відповідати наступним вимогам: можливість регулювання та стабілізації напруги заряду ємнісного накопичувача енергії (ЄНЕ) в необхідних межах, простота конструкції, мінімальні масогабаритні показники, низька вартість.

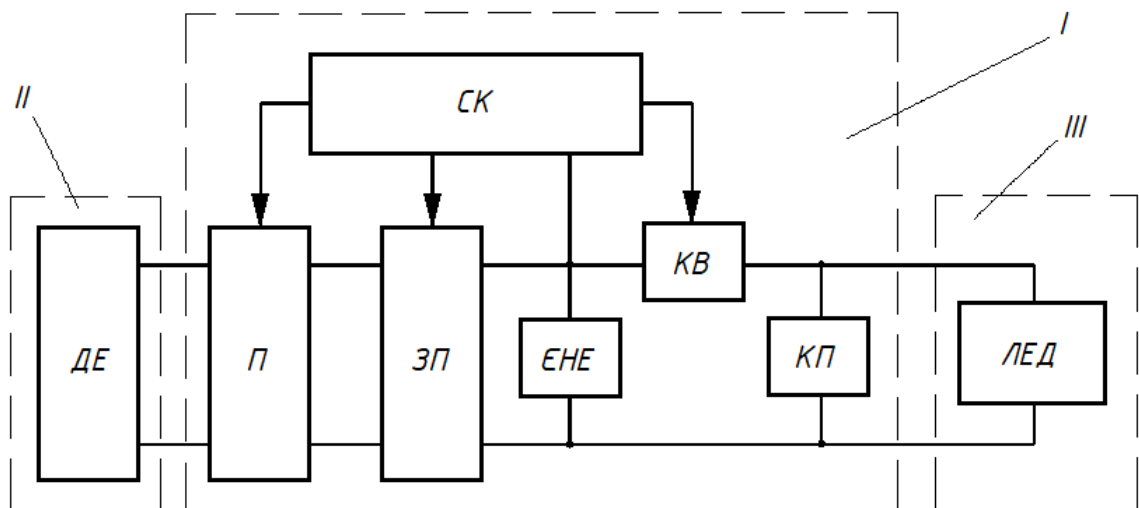
В технічній літературі існує багато інформації про ємнісні накопичувачі

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

енергії та дослідження різних схем живлення з їх використанням [31]. Ці схеми широко застосовуються для живлення машин та пристроїв при виконанні різноманітних технологічних задач, але практично не використовуються в операціях легкої промисловості.

2.4.1 Створення структурної схеми блоку живлення та керування для силових електромеханічних ударних систем в пресовому обладнанні легкої промисловості

З метою проектування систем живлення та керування силовими електромеханічними ударними приводами в пресовому обладнанні для легкої промисловості було розроблено структурний план імпульсного джерела струму з ємнісним накопичувачем енергії (I) (рис. 2.8) [32].



ДЕ – джерело енергії; П – перетворювач; ЗП – зарядний пристрій; ЄНЕ – ємнісний накопичувач енергії; КП – контур погашення магнітного поля;  
СК – система керування; КВ – керований вентиль (тиристор)

Рисунок 2.8 - Структурна схема пристрою живлення та керування силовою електромеханічною ударною системою

Структурна схема розроблялася як комплексна система, що включає джерело енергії (II) та навантажувальний пристрій, що представляє собою лінійний

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електричний двигун ЛЕД (Ш). Основними елементами джерела струму є: перетворювач (П), ємнісний накопичувач енергії (ЄНЕ), зарядний пристрій (ЗП), контур погашення магнітного поля (КП) й система керування (СК) [7].

Зарядний пристрій (ЗП) вмикається і вимикається за допомогою комутуючих елементів, що знаходяться в перетворювачі (П).

Система керування (СК) виконує наступні функції: вмикає і вимикає зарядний пристрій від електричної мережі, контролює процес заряду ЄНЕ, подає керуючий сигнал на керований вентиль (КВ), який регулює подачу енергії до двигуна.

Розрядний контур складається з ЄНЕ ємністю  $C_{с.н.е.}$  та нелінійних зі змінними у часі параметрів активного опору  $R_a$ , індуктивності  $L_k$  лінійного електричного двигуна.

2.4.2 Створення систем живлення та керування для силових електромеханічних ударних приводів, що використовуються в пресовому обладнанні легкої промисловості

На основі структурної схеми були розроблені схеми живлення та керування для силових електромеханічних ударних систем в пресовому обладнанні різної потужності, які використовуються для виконання технологічних операцій легкої промисловості [33-35]. Електрична схема блоку живлення СЕМУС пресового обладнання з ЛЕД, де ємнісний накопичувач енергії та комутаційний апарат прямої дії контактів при "заряді-розряді" конденсаторів, представлена на рис. 2.9 [32]. Цей пристрій виконано у вигляді окремого блоку. Він дає змогу дискретно змінювати енергію, яка подається до котушки індуктивності ЛЕД. Це, в свою чергу, дозволяє: регулювати величину розрядного струму, що протікає через неї, змінювати тривалість імпульсу напруги, що подається на обмотку двигуна, здійснювати погашення магнітного поля лінійного електричного двигуна в кінці циклу енергоперетворення.

Пристрій живлення та керування підключається до мережі змінного

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



енергоперетворення відбувається завдяки спеціальному контуру, який складається з діода  $VD3$  та опору погашення  $R3$ . Цей контур погашення простий, надійний в роботі, дозволяє забезпечити короткий час погашення та потрібну швидкодію лінійного електричного двигуна пресового обладнання.

Для подолання недоліків використання комутаційних пристроїв прямого розряду конденсатора на котушку двигуна, а також для зменшення втрат електричної енергії, був розроблений блок живлення імпульсної машини з безконтактним комутаційним пристроєм (рис. 2.10) [32]. У цьому пристрої як безконтактний комутаційний пристрій використовується силовий тиристор.

За допомогою автотрансформатора  $T1$  виставляється необхідна напруга зарядки конденсаторів  $C1 - C8$ . Перемикачі  $SB1 - SB8$  дають можливість в електричне коло підключати конденсатори визначеної ємності для накопичення потрібної енергії заряду. При включенні перемикача  $SB9$  в положення 1 проходить зарядка конденсаторів до робочої напруги  $U_n$ . Резистор  $R1$  призначено для регулювання часу зарядки конденсаторів. Після засвічування контрольного індикатора  $HL$  перемикач  $SB9$  переводиться в положення 2 і ємнісний елемент підключається до котушки індуктивності ЛЕД (індуктивний  $L_k$  та резистивний  $R_k$  елементи є елементами схеми заміщення котушки індуктивності). Ємнісний елемент починає розряджатися. При цьому енергія електричного поля ємнісного елемента перетворюється в енергію магнітного поля індуктивного елемента і частково розсіюється в резисторі  $R_k$  котушки індуктивності.

Погашення магнітного поля лінійного електричного двигуна в кінці циклу енергоперетворення відбувається за рахунок наявності обов'язкового контуру, який складається з діода  $VD3$  та опору погашення  $R3$ . Такий контур погашення простий, надійний в роботі, дозволяє забезпечити короткий час погашення та потрібну швидкодію лінійного електричного двигуна пресового обладнання.

Для усунення недоліків використання комутаційних пристроїв прямого розряду конденсатора на котушку двигуна, а також з метою зменшення втрат електричної енергії, було розроблено блок живлення імпульсної машини за допомогою безконтактного комутаційного пристрою (рис. 2.10) [32]. За

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

безконтактний простий комутаційний пристрій було використано силовий тиристор.

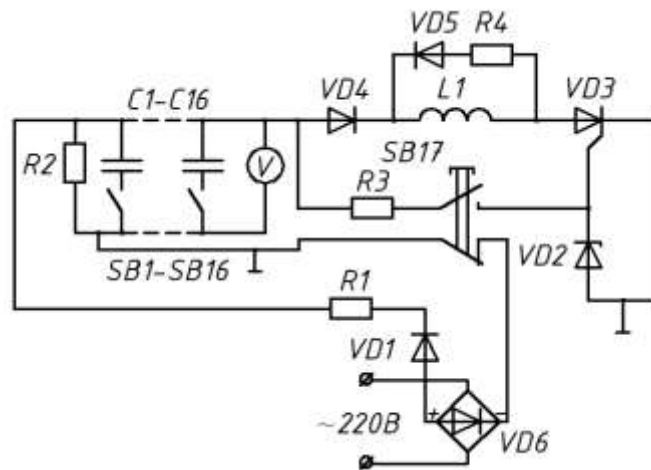


Рисунок 2.10 - Електрична схема блоку керування та живлення ЛЕД ударної машини (практичний зразок)

Пристрій живлення складається з трьох основних блоків.

Блок випрямлення: перетворює змінний струм мережі в постійний. Потужність випрямляча підбирається відповідно до потужностей зарядного контуру та лінійного електричного двигуна.

Зарядний контур: накопичує енергію у вигляді заряду в батареї конденсаторів (C1-C16). Для зняття залишкового заряду після зарядки паралельно до батареї підключено резистор R2. Щоб запобігти зворотним струмам, використовується діод VD1.

Розрядний контур: забезпечує подачу накопиченої енергії з конденсаторів на котушку індуктивності ЛЕД.

Опишемо детальніше про роботу кожного блоку.

Блок випрямлення: потужність випрямляча визначається потужністю зарядного контуру та ЛЕД. Випрямляч може бути побудований на основі діодів, тиристорів або інших напівпровідникових елементів.

Зарядний контур. Зарядка конденсаторів відбувається через резистор R1, який обмежує струм заряду. Це важливо, адже на початку зарядки опір конденсаторів близький до нуля, що може призвести до перевантаження мережі

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

або пошкодження схеми. Для зняття залишкового заряду після зарядки використовується резистор  $R2$ . Діод  $VD1$  запобігає зворотним струмам.

Розрядний контур. Цей блок забезпечує подачу накопиченої енергії з конденсаторів на котушку індуктивності ЛЕД. Детальна схема та принцип роботи розрядного контуру можуть відрізнятися залежно від конкретної реалізації. Розрядний контур складається з батареї конденсаторів  $C1-C16$ , котушки ЛЕД  $L1$  та тиристор  $VD3$ . Елементи  $VD2$  та  $R3$  використовують для відкривання тиристора  $VD3$ . Котушка  $L1$  разом з елементами  $VD5$  та  $R4$  є колом прискореного розряду, призначене для зняття ЕРС самоіндукції.

Ось опис принципу роботи пристрою живлення та керування.

Зарядка конденсатора. При вмиканні блоку живлення конденсатор заряджається до робочої напруги, яку можна контролювати за допомогою вольтметра  $V$ . Після завершення зарядки установка готова до роботи.

Розрядка конденсатора. При натисканні кнопки  $SB17$  зарядний контур від'єднується від блоку випрямляча, а розрядний контур замикається.

Відкриття тиристора. Накопичена енергія батареї конденсаторів  $C1-C16$  використовується для відкриття тиристора  $VD3$ .

Розрядка конденсаторів. Після відкриття тиристора  $VD3$  розряд батареї конденсаторів  $C1-C16$  відбувається на котушку індуктивності  $L1$ .

Створення тягового зусилля. Потужний імпульс струму, що проходить через котушку індуктивності  $L1$ , створює тягове зусилля.

Виникнення ЕРС самоіндукції: Разом з тяговим зусиллям, навколо котушки індуктивності створюється потужне магнітне поле, яке стрімко затухає. Це призводить до виникнення в котушці електрорушійної сили (ЕРС) самоіндукції.

Погашення ЕРС самоіндукції. ЕРС самоіндукції гаситься в колі прискореного розряду.

Повторення циклу. При натисканні кнопки  $SB17$  весь цикл повторюється.

Недоліком схеми живлення та керування, описаної раніше, є те, що вона потребує ручного контролю розряду конденсаторної батареї  $C1-C16$  за допомогою вольтметра  $V$ . Для вирішення цієї проблеми була розроблена нова електрична

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

схема блоку живлення ЛЕД з мікроконтролерним керуванням (рис. 2.11, [БРМА24.00.00.000Е2]) [32]. Цей блок живлення складається з чотирьох частин: випрямляч (перетворює змінний струм мережі в постійний); зарядний контур (накопичує енергію у вигляді заряду в батареї конденсаторів  $C1-C16$ ); розрядний контур (забезпечує подачу накопиченої енергії з конденсаторів на котушку індуктивності ЛЕД); мікроконтролер (керує роботою зарядного та розрядного контурів).

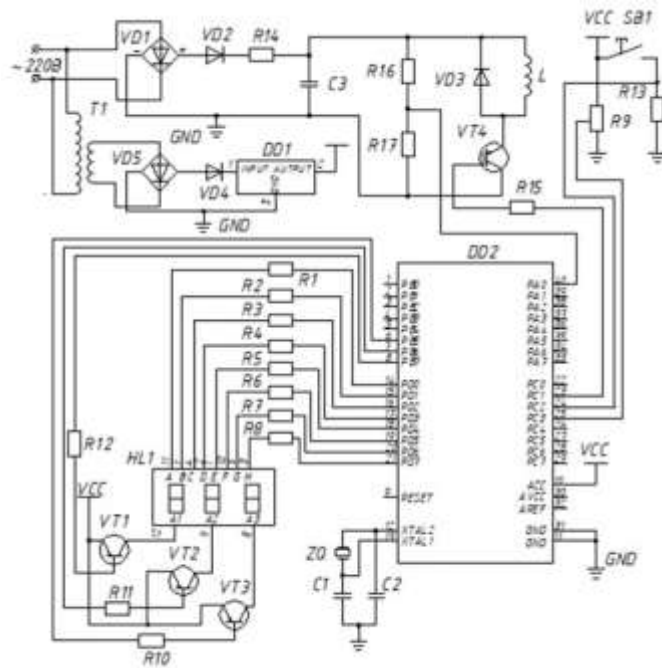


Рисунок 2.11 - Електрична схема блоку живлення ЛЕД з мікроконтролерним керуванням

Принцип роботи перших трьох частин був описаний раніше.

Мікроконтролер введено в схему для більш точного дозування енергії заряду: заряд батареї конденсаторів контролюється мікроконтролером за допомогою електричного табло. Заряд може встановлюватися в процентних відсотках від максимальної потужності; плавного регулювання напруги зарядки конденсатора: мікроконтролер регулює напругу зарядки конденсатора до встановленої робочої; автоматичного керування розрядом: мікроконтролер керує розрядом конденсаторів на котушку індуктивності ЛЕД, що забезпечує більш точне та плавне керування роботою ЛЕД.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

Розроблені схеми живлення та керування силовими електромеханічними ударними системами можуть бути використані в пресовому обладнанні різної потужності (параметри схеми можуть бути налаштовані відповідно до потреб конкретного пресового обладнання та технологічної операції, що виконується); в установках для дослідження силових електромеханічних ударних систем (схема може використовуватися для дослідження характеристик та параметрів роботи ЛЕД).

## 2.5 Розробка структурної схеми пристрою

Першим кроком у розробці машини з двохкоординатною системою переміщення для перфорації та маркування деталей і виробів стало створення її структурної схеми, яку представлено на рис. 2.12 (аркуш [БРМА24.00.00.000С1]).

Структурна схема машини складається з наступних основних компонентів: система переміщення деталей, що складається із двох механізмів переміщення по координаті X і Y; два крокових двигуни; драйвер крокових двигунів (КД); пристрій живлення драйверів КД; лінійний електричний двигун (ЛЕД) з ударним механізмом; пристрій живлення й керування ЛЕД; ЕОМ.

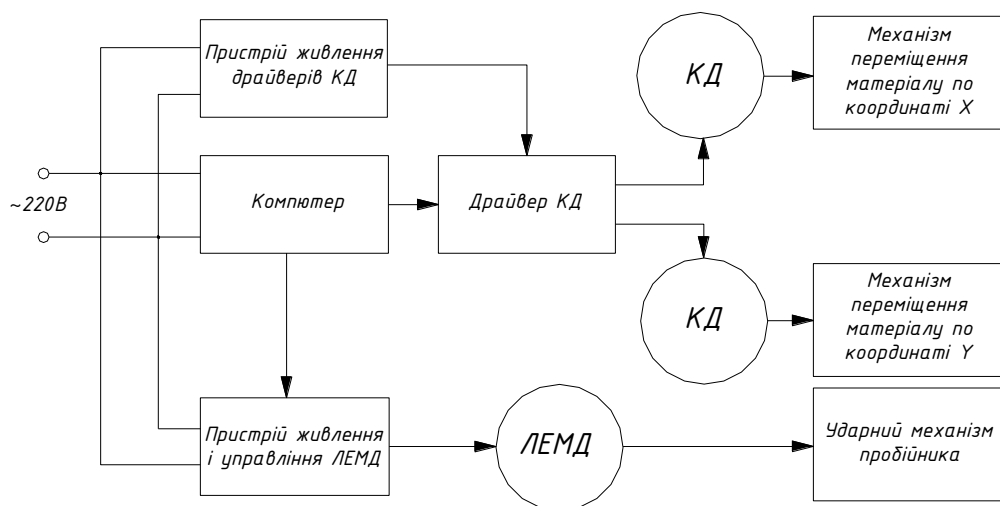


Рисунок 2.12 - Структурна схема машини з двохкоординатним переміщенням для перфорування деталей верху взуття

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

## 2.6 Розробка двохкоординатної системи переміщення деталей

Розглянемо механізм переміщення деталей по координатах X та Y.

В вищезгаданому механізмі використано гвинтову пару (гвинт-гайка), лінійні підшипники, вали, опорні вали, кріплення валу, кріплення підшипника, кріплення двигунів, стійки порталу тощо. Основні елементи даної системи приведені на рис.2.13 - 2.17.



Рисунок 2.13 – Гвинтова пара в зборі



Рисунок 2.14 – Напрямна для переміщення ЛЕМД



Рисунок 2.15 – Кріплення двигуна

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49



Рисунок 2.16 – Стійка порталу



Рисунок 2.17 – Опорний вал

## 2.7 Розробка лінійного електромагнітного двигуна з ударним механізмом

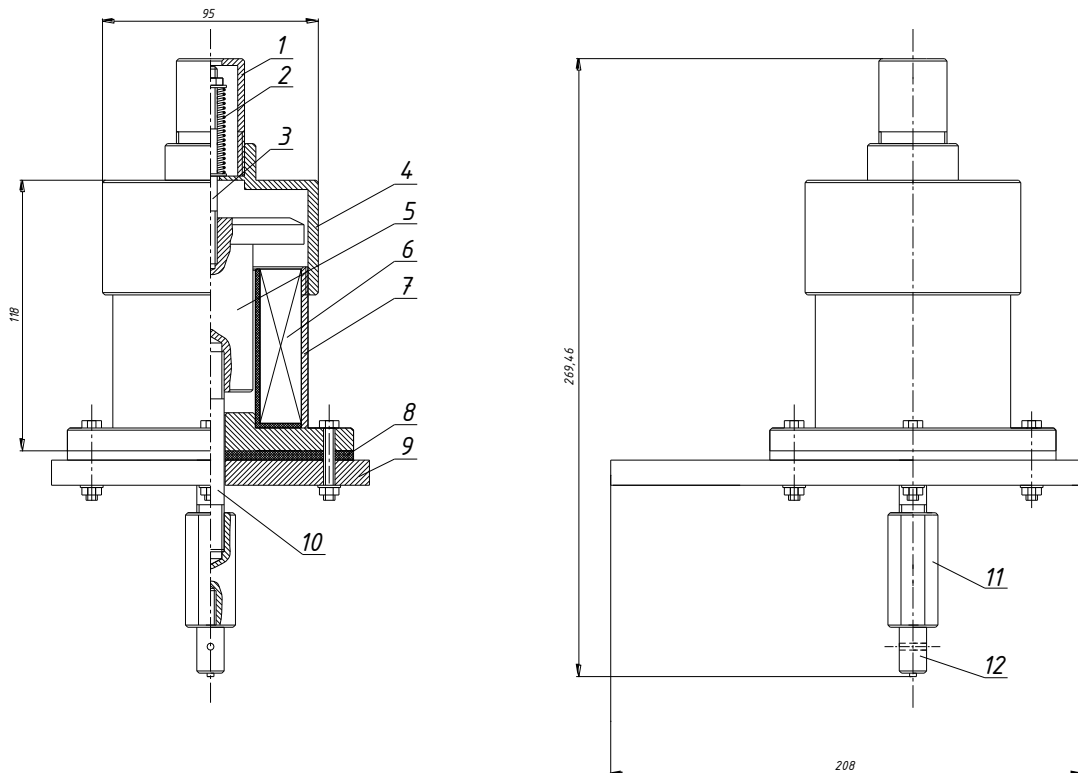
### 2.7.1 Розробка конструкції лінійного електромагнітного двигуна

З метою приводу робочого інструменту, а саме пробійника для перфорації деталей верху взуття, була розроблена конструкція лінійного електромагнітного двигуна. Така конструкція приведена на рис.2.18 (лист [БРМА24.00.00.000ВЗ]).

Лінійний електромагнітний двигун жорстко фіксується на порталі, який, в свою чергу, змонтований на станині пристрою.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Лінійний електромагнітний двигун працює за наступним принципом: електромагнітне поле (при подачі імпульсу напруги з пристрою живлення та керування в котушці 6 виникає електромагнітне поле); електромагнітна сила (ця сила втягує якір 5, до якого прикріплений пробійник 12, всередину котушки); стиснення пружини (під час руху якоря пружина 2 стискається); пробиття деталі (коли пробійник 12 досягає деталі взуття, він пробиває її); повернення в початковий стан (після зняття напруги стиснута пружина штовхає рухому частину двигуна назад в початкове положення).



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

Рисунок 2.18 - Лінійний електромагнітний двигун:

### 2.7.2 Загальний вигляд розробленої конструкції ЛЕМД

На основі проведених розрахунків всіх компонентів лінійного двигуна, було здійснено його виготовлення. Усі деталі виготовлені зі сталі. 45.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

На рис.2.19 показано загальний вигляд виготовленого ЛЕМД.



Рисунок 2.19 – Фото розробленого електромагнітного двигуна

### 2.7.3 Пробійники для виконання операції перфорування деталей

Для виконання операції перфорації деталей були обрані пробійники та вирубна плита, які слугують робочим інструментом та технологічною оснасткою. Таким чином було використано круглі пробійники з ріжучим лезом замкнутого контуру діаметром 2, 3, 4, 5, 6, 8 мм. Вони виготовлені із сталі У7А, з оптимальним кутом загострення  $25^{\circ}$  і без притуплення. На рис.2.20 представлені дані пробійники.

Вирубна плита для цього лінійного електромагнітного двигуна виготовлена з полівінілхлориду (ПВХ). Цей матеріал часто використовується для виготовлення вирубних плит, які застосовуються при вирубванні деталей на електрогідравлічних пресах.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52



Рисунок 2.20 - Пробійники для перфорування отворів у деталях

На рис.2.21 показано кріплення пробійника до якоря ЛЕМД.



Рисунок 2.21 – Кріплення робочого інструменту

2.8 Створення системи керування електроприводом установки для перфоруції на основі мікроконтролера

2.8.1 Обґрунтування вибору крокового двигуна для двохкоординатної системи переміщення деталей

Для двохкоординатної системи було вибрано крокові двигуни з силою утримання 4 кг [44].

Приведемо технічні характеристики крокового двигуна NEMA23 57HS5128B4: 1,8 градусів/крок; сила утримання 1,1 Н·м; крутний момент 1,1 Н·м;

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

напруга 2,5 В; струм 2,8 А; опір фази 0,83 Ом; індуктивність фази 2,2 мГ; діаметр валу 6,35 мм; розміри 57x57x51 мм.

На рис.3.11 приведено загальний вигляд крокового двигуна NEMA23 57HS5128B4.



Рисунок 2.22 - Загальний вигляд крокового двигуна NEMA23 57HS5128B4

На рис.2.23 приведено габаритне креслення даного двигуна.

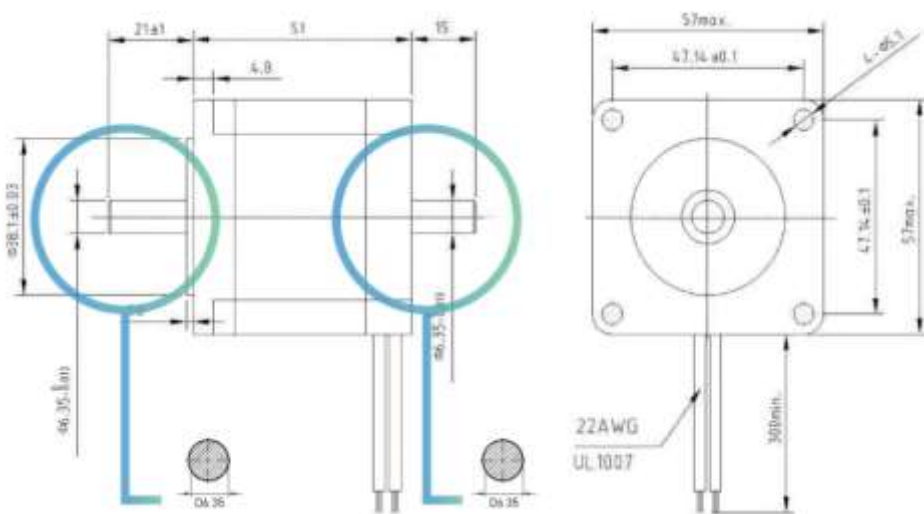


Рисунок 2.23 - Габаритне креслення крокового двигуна NEMA23 57HS5128B4

На рис.2.24 приведена електрична схема підключення обмоток двигуна.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

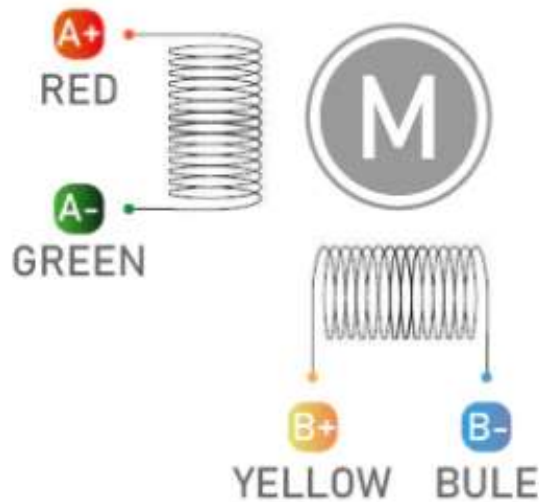


Рисунок 2.24 - Електрична схема підключення обмоток двигуна

Щодо забезпечення двох координатного переміщення робочого органу та порталу вибрано 2 крокових двигуна NEMA23 57HS5128B4.

## 2.8.2 Вибір драйвера крокового двигуна

### 2.8.2.1 Загальні відомості про драйвери крокових двигунів

Драйвер є силовим елементом з простим інтерфейсом "крок-напрямок" [45]. Він діє як підсилювач потужності, перетворюючи імпульси з джерела живлення на переміщення валу двигуна, де кожен імпульс відповідає одному кроку (або мікрокроку).

Драйвер має спеціальну схему, яка виконує три ключові функції:

- вмикання/вимикання та зміна напрямку струму в обмотках, гарантуючи безперебійну роботу системи керування електричним приводом;
- підтримка заданого значення струму;
- забезпечення максимально швидкого наростання/спадання струму для досягнення необхідних характеристик швидкості, які, в свою чергу, суттєво впливають на керування кроковим двигуном.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

Драйвери поділяються на типи відповідно до потужності валу крокового двигуна.

Сучасні технології виробництва приводів крокових двигунів постійно вдосконалюються, прагнучи досягти максимального моменту на валу при мінімальних габаритах, широких швидкісних можливостях, високого ККД та кращої точності. Важливою складовою цього прогресу є використання мікрокрокового режиму.

Контролер управління кроковим двигуном є одним з ключових елементів системи. Зазвичай він ґрунтується на промислових мікроконтролерах і може бути апаратним або програмним. Програмні контролери застосовуються для простих задач і мають значно нижчу вартість, ніж апаратні.

Контролери можуть керувати як уніполярними, так і іншими типами крокових двигунів, при цьому середній струм обмотки може досягати 2,5 А.

Конструктивно контролер складається з силової частини (драйвера) та інтелектуальної частини, яка розширює можливості керування двигуном.

Цей компонент має низку переваг, зокрема, можливість передачі сигналів "крок-напрямок".

Переваги використання контролерів для крокових двигунів:

- під'єднання до комп'ютера: залежно від моделі та конструкції, контролер може підключатися до комп'ютера для керування та регулювання;
- багаторазове перепрограмування: це дозволяє використовувати один контролер для різних задач, просто перепрограмуючи його;
- широкий вибір моделей: різноманіття контролерів від вітчизняних та зарубіжних виробників дає можливість вибрати модель з розширеними функціями. Такі контролери можуть мати вбудований ПЛК, що дозволяє їм працювати автономно за заданою програмою, перетворюючи їх на готові пристрої для виконання конкретних технологічних процесів.

Пристрій управління електричним приводом з контролером виконує ряд важливих функцій.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

По-перше, досягнення високої точності: конструкція пристрою, що використовує мікрокроковий режим, дозволяє здійснювати до 20 000 кроків за один оборот.

По-друге, робота з програмним забезпеченням: Пристрій сумісний з виробничими програмами Mach і Kcam.

По-третє, функціонування в різних режимах:

- Online: підкорення командам комп'ютера;
- Offline: виконання програми з зовнішнього носія (флеш-накопичувач);
- суміщений: змінне керування з комп'ютера та автономна робота.

По-четверте, блок керування кроковим двигуном:

- джерело струму для двигуна;
- дроблення основного кроку (якщо потрібно);
- комутація фаз двигуна;
- підтримка ручного та автоматичного керування;
- можливість програмування та синхронізації з іншими пристроями;
- автоматичне керування електричними приводами.

По-п'яте, способи керування:

- за допомогою комп'ютера: LPT-порт, COM-порт, автономний режим, ручний режим;

- вибір блоку керування: залежно від типу крокового двигуна.

По-шосте, поширені методи управління:

- одиночні імпульси: підключення однієї котушки, 48 імпульсів на оборот (7,5 градусів на імпульс);

- подвійний імпульс: підключення двох котушок, 48 імпульсів на оборот (7,5 градусів на імпульс);

- об'єднані імпульси: поєднання першого та другого методів, 96 імпульсів на оборот (3,75 градусів на імпульс).

Важливо зазначити, що вибір способу керування залежить від характеру завдань та типу крокового двигуна.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 2.8.2.2 Вибір драйвера крокових двигунів

Для крокових двигунів ми обрали драйвер BL-TB6600 1.2V, побудований на базі чипа TB6600HG від компанії Toshiba (рис.3.14).

Характеристики вищезгаданого драйвера:

- напруга живлення двигуна: 10 - 42В;
- номінальний струм двигуна (регулюємий): 0,5 - 4 А;
- максимальний струм двигуна (примусове охолодження): 4,5 А;
- напруга живлення логіки : 4,75-5,25 В;
- рівень логічних сигналів, що підтримується: 3.3 и 5 В;
- дріблення кроку: крок, напівкрок, 1/4, 1/8, 1/16;
- тип керування: крок – напрямок;
- максимальна частота ШІМ: 200 кГц;
- безступенева опорна напруга;
- опторозв'язаний цифровий вхід, швидкісна оптопара 6N137.

На рис.2.25 приведено загальний вигляд драйвера крокового двигуна.



Рисунок 2.25 – Загальний вигляд драйвера крокового двигуна  
BL-TB6600 1.2V

На рис.2.26 приведена електрична схема драйвера крокового двигуна.

Оптоізоляція вхідних сигналів виконана на оптопарах 4Т35, 6N137 і РС817. Для сигналу STEP використовуємо швидкодіючий оптрон 6N137, де частота сигналу STEP може досягати 15 кГц. Решта сигналів такої швидкодії не потребують.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

Блок установки номінального струму має можливість підключати паралельно до трьох резисторів. Це дозволяє гнучко регулювати опір датчиків струмів фаз, налаштовуючи їх під конкретні потреби (резистори NF).

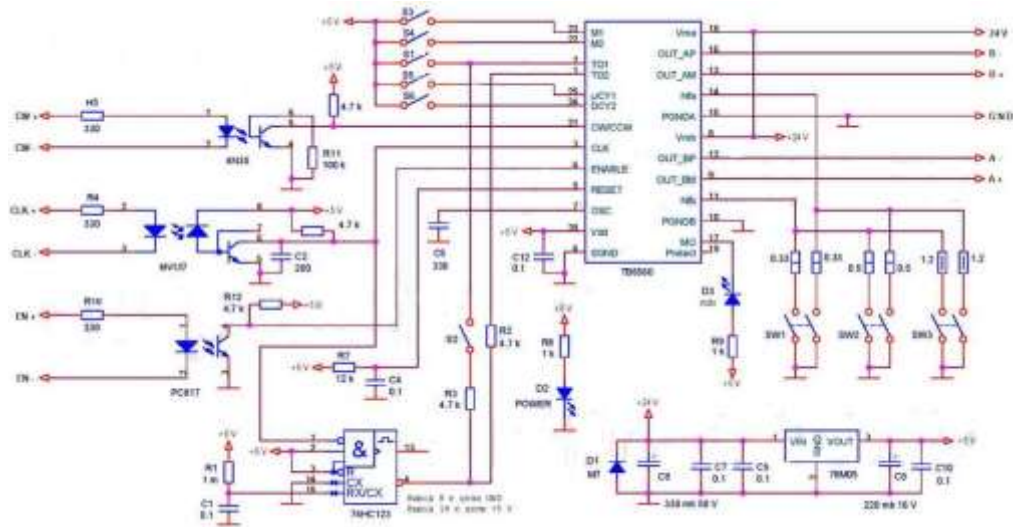


Рисунок 2.26 - Електрична схема драйвера крокового двигуна BL-TB6600 1.2V

Блок визначення зупинки двигуна використовує одинібратор 74HC123. Сигнал STEP перезапускає одинібратор по кожному від'ємному фронту. Коли двигун зупиняється, тобто імпульси сигналу STEP припиняються, одинібратор закінчує відпрацьовувати останній вихідний імпульс й переходить в стан високого рівня (вивод 4). Елементами R1, C1 задається час імпульсу одинібратора та становить 45 мс. Отже, якщо імпульси сигналу STEP слідуєть з періодом не менше приблизно 50 мс, то вивод 4 одинібратора 74HC123 знаходиться в низькому стані та робочий струм визначається перемикачем S1. Після припинення імпульсів сигналу STEP, вивод 4 переходить в високий рівень й встановлює на входах TQ1 і TQ2 мікросхеми TB6560 режим зниженого струму.

На рис.2.27 приведена схема підключення драйвера крокового двигуна BL-TB6600 1.2V.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

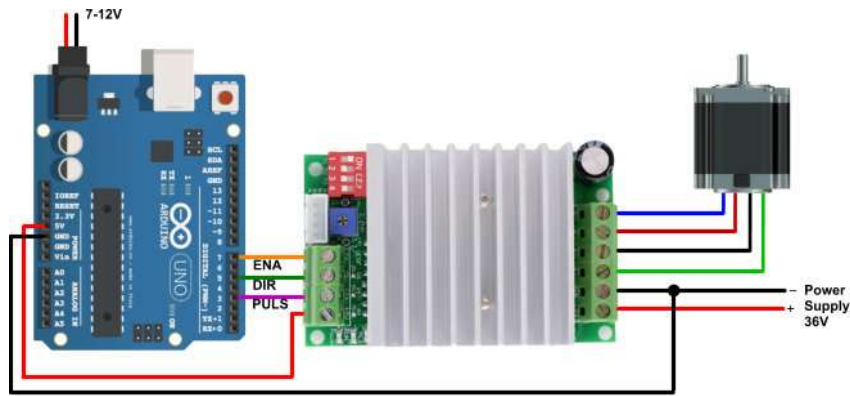


Рисунок 2.27 – Схема підключення драйвера крокового двигуна

### 2.8.3 Вибір контролера управління кроковими двигунами

Для керування кроковими двигунами ми обрали контролер Arduino UNO.

Arduino UNO - це є плата мікроконтролерів з відкритим кодом на базі мікроконтролера ATmega328P, який широко використовується. До його складу входить все потрібне щодо зручної роботи з мікроконтролером:

- 14 цифрових входів/виходів (з них 6 можуть застосовуватися в якості ШІМ-виходів);
- 6 аналогових входів;
- кварцовий резонатор на 16 МГц;
- роз'єм для програмування всередині схеми (ICSP);
- роз'єм USB, роз'єм живлення;
- кнопка скидання.

Для того, щоб пристрій почав роботу, необхідно подати живлення від AC/DC-адаптера чи батарейки, або під'єднати його до комп'ютера за допомогою USB-кабелю.

На відміну від попередніх плат Arduino UNO, в якості перетворювача інтерфейсів USB-UART застосовується мікроконтролер ATmega16U2 (ATmega8U2 до версії R2) замість мікросхеми FTDI.

Для спрощення процесу оновлення прошивки на платі Arduino Uno версії R2 доданий резистор, який підтягує до землі лінію HWB мікроконтролера 8U2 на рис.2.28 показано підключення портів Arduino UNO.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

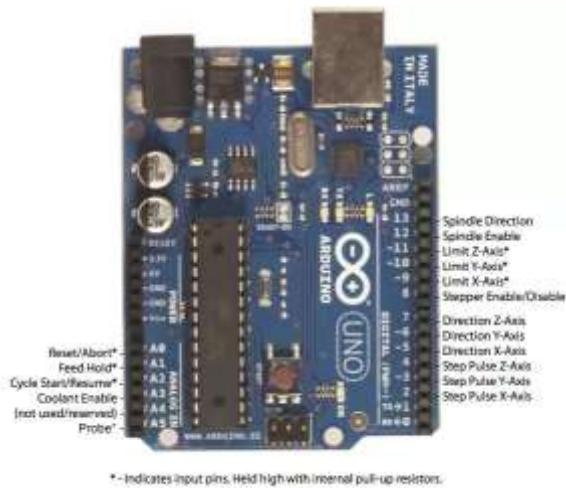


Рисунок 2.28 - Підключення портів Arduino UNO

На рис.2.29, 2.30 приведено схеми підключення Arduino UNO.

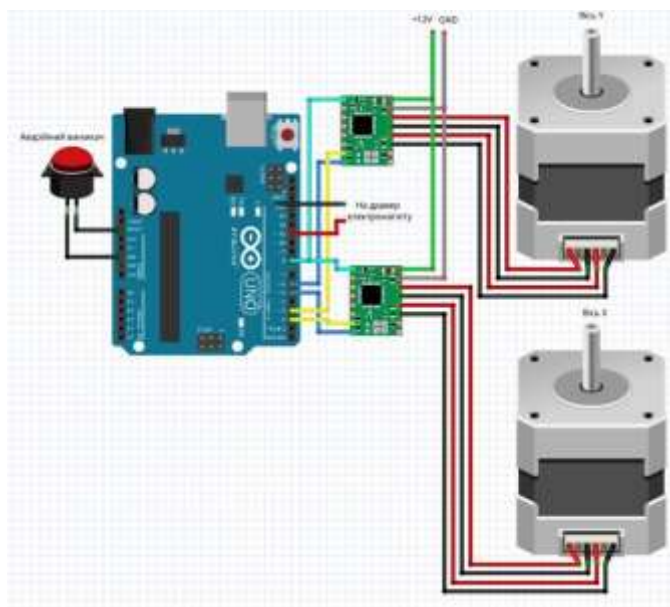


Рисунок 2.29 – Схема підключення контролера Arduino UNO



Рисунок 2.30 - Підключення контролера Arduino UNO

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

## 2.9 Пристрій живлення драйверів крокових двигунів

### 2.9.1 Загальні відомості про пристрої живлення

Блок живлення (БЖ) - це пристрій, який призначений для формування потрібного споживачеві (навантаженні) напруги (при заданому струмі навантаження), як при його живленні від електромережі, так й від інших джерел.

Пристрої живлення розділяються на: автономні; неавтономні; стабілізовані; нестабілізовані, з фільтрацією; без фільтрації, захистом; без захисту.

Блоки живлення бувають трансформаторними та імпульсними [15].

Трансформаторний блок живлення.

Класичним блок живлення (БЖ) є трансформаторний. Як правило, він складається з понижуючого трансформатора, в якого первинна обмотка розрахована на напругу від мережі. Після встановлюється випрямляч, який перетворює змінну напругу в постійну (пульсуючу односпрямовану). Як правило, випрямляч складається з одного діода (однонапівперіодний випрямляч), або чотирьох діодів, які утворюють діодний міст (двохнапівперіодний випрямляч). Інколи застосовуються й інші схеми, наприклад, у випрямлячах з подвоєнням напруги. Після випрямляча встановлюється згладжуючий фільтр коливань (пульсацій). Зазвичай він є просто конденсатором великої ємності. Також в схемі можуть бути встановлені фільтри високочастотних перешкод, сплесків, захисту від короткого замикання, стабілізатори напруги й струму.

Імпульсні блоки живлення.

Імпульсний блок живлення має більш високий ККД за рахунок того, що працює в ключовому режимі, а регулювання та стабілізація вихідних напруг здійснюється методом широтно-імпульсної модуляції.

Принцип роботи імпульсного блоку живлення доволі є простим: для того, щоб застосовувати високочастотні трансформатори, потрібно перетворити струм з мережі (220 вольт, 50 Гц) у високочастотний струм (близько 60 кГц); струм з електромережі йде на вхідний фільтр, який відсікає імпульсні високочастотні

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перешкоди, що утворюються при роботі, далі йде на випрямляч, на виході якого стоїть електролітичний конденсатор для згладжування самих пульсацій; наступний етап - постійна випрямлена напруга близько 300 В надходить на перетворювач напруги, що перетворює вхідну постійну напругу в змінну напругу з прямокутною формою імпульсів високої частоти.

До складу перетворювача входить імпульсний трансформатор, який забезпечує гальванічну розв'язку від мережі та зниження напруги до необхідних значень. У серійному випуску ці трансформатори є дуже маленькими в порівнянні з класичними, в них мала кількість витків, а також застосовується феритовий замість металевого осердя. Після напруга, яка знімається з трансформатора, йде на вторинний випрямляч й високочастотний фільтр, що складається з індуктивностей та електролітичних конденсаторів. Для забезпечення плавного вмикання і захист від перевантажень, також стабільної напруги та роботи застосовуються модулі.

Імпульсний блок живлення забирає з електричної мережі рівно стільки енергії, скільки споживає навантаження. У разі якщо потужність, що споживається навантаженням буде вище потужності, на яку розрахований блок живлення, то сила струму, що протікає по колам блоку, також буде вищою за ту, на яку розраховані провідники й елементи, що, в свою чергу, призведе до сильного нагрівання та, в кінцевому результаті, до виходу блоку живлення з ладу. Тому на виході блоку живлення розміщено датчик вихідної потужності, й захисна схема відразу відімкне блок живлення, у разі коли розрахункова потужність навантаження буде більше його максимальної потужності.

## 2.9.2 Опис пристрою живлення драйверів крокових двигунів та мікроконтролера

На рис.2.31 приведений блок живлення, який був використаний для живлення драйверів крокових двигунів та мікроконтролера. Даний блок було

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перероблено відповідно до тих характеристик по живленню, які мають драйвери крокових двигунів.



Рисунок 2.31 – Загальний вигляд пристрою живлення драйверів крокових двигунів

## 2.10 Розробка пристрою живлення та управління роботою лінійного електромагнітного двигуна

Для забезпечення живлення та керування ЛЕМД було розроблено спеціальний пристрій. Детальний опис електричної схеми цього пристрою наведено вище в розділі 2 (рис.2.11, аркуш [БРМА24.00.00.000Е2]).

Сила удару, яку може генерувати двигун, залежить від двох факторів: напруга живлення джерела постійного струму (чим вища напруга, тим більша сила удару) та переміщення якоря (чим більше переміщення, тим більша потенційна енергія, яка може бути перетворена в кінетичну енергію удару).

Важливо зазначити, що сила удару може значно перевищувати статичне зусилля двигуна, іноді до 10 разів. Час спрацьовування лямбда-зонда (ЛЕМД) також залежить від прикладеної напруги:

- при 0,3 мілісекунди: ЛЕМД спрацьовує найшвидше;
- при 10 мілісекундах: ЛЕМД спрацьовує найповільніше.

Отже, для досягнення оптимальних характеристик важливо правильно підібрати напругу живлення та врахувати час спрацьовування ЛЕМД.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

По розробленій електричній схемі було виготовлено друковану плату, підібрано радіо елементи та проведено їх монтаж. Після чого було розроблений та виготовлений корпус пристрою.

На рис.2.32 приведено фото розробленого пристрою живлення та керування ЛЕМД.



Рисунок 2.32 – Фото розробленого пристрою живлення та керування ЛЕМД

2.11 Розробка програмного забезпечення управління роботою пристрою з двохкоординатною системою переміщення

Комп'ютерна програма щодо керування роботою пристрою з двохкоординатною системою переміщення була створена в застосунку GRbl Controller3.6.1 (рис.2.33).



Рисунок 2.33 – Вікно програми GRbl Controller3.6.1

GRbl Controller - це програмне забезпечення (ПЗ), що призначене для відправлення GCode на машини з числовим програмним управлінням.

2.12 Загальний вигляд установки з двохкоординатною системою переміщення та мікроконтролерною системою керування

Використовуючи ЛЕД, буде створено пристрій з двокоординатною системою переміщення, призначений для виконання операцій у легкій промисловості. Тип використовуваних світлодіодів може бути змінений залежно від виконуваної операції для керування робочим органом.

Основними елементами машини будуть: пристрій для виконання двохкоординатного переміщення деталі із закріпленим лінійним електричним двигуном, призначеним для перфорації деталей взуття; система управління кроковими двигунами; пристрій живлення драйверів крокових двигунів та пристрій живлення й керування лінійним електричним двигуном.

Опишемо принцип роботи розробленої машини. Матеріал розміщують на робочому столі. До цього, за допомогою розробленого ПЗ, створюється потрібний малюнок для виконання операції перфорування. Машина запускається в дію та відбувається перфорування деталі за розробленою програмою з допомогою пробійника, що прикріплений до лінійного електричного двигуна.

Замінивши пробійник на голку та створивши відповідне ПЗ можна виконувати операцію маркування деталей або виробів.

### 2.13 Висновки до другого розділу

З метою оптимізації пресового обладнання легкої промисловості була розроблена узагальнена структура силової електромеханічної ударної системи. Ця структура ґрунтується на всебічному аналізі: електромеханічних характеристик електродвигунів та технічних характеристик технологічних операцій легкої промисловості. Отримана теоретична модель силової електромагнітної ударної

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

системи є складною, але цілісною системою, що складається з: взаємопов'язаних елементів, функціональних та інформаційних зв'язків, системи керування.

В ході дослідження було доведено, що циліндричний лінійний електромагнітний двигун з комбінованим якорем та стопом є оптимальним вибором для ударного методу виконання технологічних операцій легкої промисловості.

З метою забезпечення належного функціонування силової електромеханічної ударної системи в пресовому обладнанні легкої промисловості, було розроблено схеми живлення та керування з ємнісними накопичувачами енергії.

У ньому описується структурна схема пристрою, а також система переміщення деталей у двох координатах. Детально розроблена конструкція лінійного електромагнітного двигуна.

Описані робочі інструменти – пробійники, призначені для виконання операції перфорування. Обґрунтовано вибір крокових двигунів, контролера та драйверів для їх керування.

Розроблені блоки живлення для описаного електричного обладнання.

Окрім цього, представлено програмне забезпечення, що забезпечує виконання операції перфорування деталей на розробленому пристрої.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3 РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ КОНСТРУКЦІЇ ПРИСТРОЮ З ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПРИВОДОМ

#### 3.1 Розрахунок пружини лінійного електромагнітного двигуна

У однообмоткових лінійних електромагнітних двигунах (ЛЕМД), що використовуються в приводі пресового обладнання, робочий хід якоря, з'єднаного з робочим інструментом, відбувається завдяки електромагнітним силам. Ці сили виникають при подачі імпульсу напруги на обмотку самого двигуна. Повернення якоря в початковий стан (холостий хід) забезпечується гвинтовою циліндричною зворотною пружиною стискання (рис.3.1).

Оскільки рухомі частини лінійного електромагнітного двигуна повинні повертатися в заданий час після робочого ходу, виникає необхідність у розробці методики розрахунку пружини, яка буде забезпечувати це повернення.

Для розрахунку та вибору зворотної пружини однообмоткового ЛЕМД, який застосовується в якості приводу ударної машини, вихідними даними є:

- максимальна частота ходів  $n$ ,
- маса рухомих частин лінійного двигуна й технологічного оснащення  $m$ ,
- хід якоря  $h$  [45].

Вихідні дані:  $n = 90$  ход/хв.;  $m = 0,82$  кг;  $h = 15$  мм;  $V_0 = 5,5$  м/с;  $D = 9,63$  мм  $\approx 10$  мм. Двигун встановлено вертикально.

1). Час повернення якоря ЛЕМД в визначається із виразу:

$$T_B = (0,02 \dots 0,04)(60/n) \quad (3.1)$$

де  $n$  – частота ходів ЛЕМД,  $n = 40$ ;

$$t_B = 0,025 \cdot (60/40) = 0,017 \text{ с.}$$

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

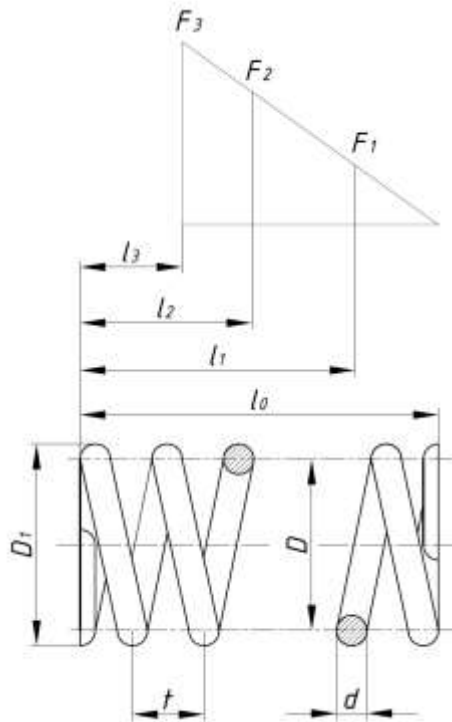


Рисунок 3.1 – Зворотна пружина лінійного електромагнітного двигуна

2). Визначаємо величину відносного інерційного зазору пружини стискання із співвідношення [43]:

$$\delta=0,05\dots0,25$$

3). Сила пружини  $P_1$  при попередній деформації, що викликана вагою рухомих частин, визначається за формулою:

$$P_1=mg\cos\alpha \quad (3.2)$$

де  $m=0,82$  кг – маса рухомих частин лінійного електромагнітного двигуна;

$\alpha$  – кут нахилу ЛЕМД до вертикалі;

$g$  – прискорення вільного падіння.

В нашому випадку  $\alpha=0 \Rightarrow$

$$P_1=mg=0,82\cdot9,8=8,036 \text{ Н.}$$

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

4). Сила пружини при робочій деформації визначається за формулою:

$$P_2 = (mh / t_g^2) + P_1, \quad (3.3)$$

де  $h$  – максимальне переміщення кінця пружини.

Таким чином,

$$P_2 = \frac{0,82 \cdot 0,015}{0,017^2} + 8,036 = 50,6 \text{ Н.}$$

5) Сила пружини при максимальній деформації для крайніх значень  $\delta$  визначається із виразу [43]:

$$\delta = 1 - \frac{P_1}{P_3}. \quad (3.4)$$

Отже,

$$P_3 = \frac{P_2}{1 - \delta} \quad (3.5)$$

Підставивши значення, отримаємо:

$$P_3 = \frac{50,6}{1 - (0,05 \dots 0,25)} = 53,26 \dots 67,47 \text{ Н.}$$

Виходячи із заданого діаметра  $D=10$  мм та мети щодо забезпечення найбільшої критичної швидкості, було вибрано з табл. 14 [43] пружину №283 з відповідними параметрами:  $P_3=75$  Н; діаметр дроту  $d=1,2$  мм; жорсткість одного витка  $z_1=29,820$  Н/м; зовнішній діаметр пружини  $D=10$  мм; найбільший прогин одного витка  $s_3=2,515$  мм.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

60. Максимальне дотичне напруження при крученні визначається за формулою:

$$\tau_3 \approx 0,5\sigma_B, \quad (3.6)$$

де  $\sigma_B=2350 \text{ Н/мм}^2 \Rightarrow$

$$\tau_3 \approx 0,5 \cdot 2350 = 1175 \text{ Н/мм}^2.$$

7) Критична швидкість розраховуємо за формулою:

$$V_{кр} = \frac{\tau_3 \left(1 - \frac{P_2}{P_3}\right)}{\sqrt{2G\rho}}, \quad (3.7)$$

де  $G=7,85 \cdot 10^4 \text{ кгс/мм}^2$  – модуль зсуву,

$\rho=8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  – густина матеріалу для пружинної сталі.

Таким чином,

$$V_{кр} = \frac{1175 \cdot \left(1 - \frac{50,6}{67,47}\right)}{\sqrt{2 \cdot 7,85 \cdot 10^4 \cdot 8 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3}}} = 8,3 \text{ м/с.}$$

Визначаємо співвідношення:

$$\frac{V_0}{V_{кр}} = \frac{5,5}{8,3} = 0,66 < 1.$$

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Завдяки відсутності контакту між витками, обрана пружина володіє значною витривалістю.

8). Жорсткість пружини визначається за формулою:

$$z = (P_2 - P_1) / n, \quad (3.8)$$

$$z = \frac{(50,6 - 8,036)}{15} = 2,84 \text{ Н/мм.}$$

9). Визначаємо число витків пружини:

$$n_1 = \frac{z_1}{z}, \quad (3.9)$$

$$n_1 = \frac{29,82}{2,84} = 10,5.$$

Приймаємо  $n_1=11$ .

10). Визначаємо уточнене значення жорсткості:

$$z' = \frac{z_1}{n_1}, \quad (3.10)$$

$$z' = \frac{29,82}{11} = 2,71 \text{ Н/мм.}$$

11). Розраховуємо повне число витків пружини:

$$n_1 = n + n_2, \quad (3.11)$$

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де  $n_2$  – число неробочих витків,  $n_2=1,5$  [43].

Відповідно:

$$n_1 = 10,5 + 1,5 = 12.$$

12). Діаметр пружини розраховується за формулою:

$$D_0 = D - d, \tag{3.12}$$

Відповідно:

$$D_0 = 10 - 1,2 = 8,8 \text{ мм.}$$

13). Визначаємо попередню, робочу та максимальну деформацію:

$$F_1 = \frac{P_1}{z}, \tag{3.13}$$

$$F_2 = \frac{P_2}{z}, \tag{3.14}$$

$$F_3 = \frac{P_3}{z}, \tag{3.15}$$

Відповідно:

$$F_1 = \frac{8,036}{2,71} = 2,97 \text{ мм,}$$

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$F_2 = \frac{50,6}{2,71} = 18,7 \text{ мм},$$

$$F_3 = \frac{67,47}{2,71} = 24,9 \text{ мм}.$$

14). Визначаємо висоту пружини в вільному стані  $H_0$ , висоту пружини при попередній, робочій та максимальній деформації  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$ :

$$H_0 = H_3 + F_3, \quad (3.16)$$

$$H_1 = H_0 - F_1, \quad (3.17)$$

$$H_2 = H_0 - F_2, \quad (3.18)$$

$$H_3 = (n_1 + 1 - n_3)d, \quad (2.19)$$

де  $n_3=1,5$  – число зашліфованих витків [43];

Відповідно:

$$H_3 = (12 + 1 - 1,5) \cdot 1,2 = 13,8 \text{ мм},$$

$$H_0 = 13,8 + 24,9 = 38,7 \text{ мм},$$

$$H_2 = 38,7 - 18,7 = 20 \text{ мм},$$

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$H_1 = 38,7 - 2,97 = 35,73 \text{ мм.}$$

15). Визначаємо крок пружини:

$$t_{II} = f_3 + d, \quad (2.20)$$

Відповідно:

$$t_{II} = 2,515 + 1,2 = 3,715 \text{ мм.}$$

### 3.2 Висновки до третього розділу

В цьому розділі проведено розрахунок зворотної пружини, тобто визначено основні її параметри.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

Після ретельного аналізу методів, способів та засобів обробки матеріалів легкої промисловості за допомогою електромеханічного пресового обладнання було виявлено:

1). У легкій промисловості широко застосовуються різні технологічні операції, які виконуються на пресовому обладнанні з зворотно-поступальним рухом робочих органів. При виконанні деяких з цих операцій може використовуватися ударний вплив.

2). Серед розглянутих приводів найбільш перспективним може бути електропривод, оскільки електрична енергія є найбільш доступним й легким у трансформуванні видом енергії.

На основі огляду обладнання була розроблена класифікація приводів для технологічних операцій, що використовують ударний ефект. У цій класифікації серед електромеханічних приводів, окрім приводів з обертовими електродвигунами, були виділені приводи з лінійними електродвигунами, які є найпростішими в експлуатації, енергоефективними та мають високі питомі енергетичні показники.

3). При виконанні розглянутих технологічних операцій може використовуватися ударний ефект. Виходячи з характеру дії на об'єкт обробки, електромеханічний перетворювач енергії для пресового обладнання легкої промисловості можна сформулювати як силову електромеханічну ударну систему. Основними параметрами імпульсного технологічного процесу є енергія та частота дії.

4). На основі огляду електромеханічних характеристик електродвигунів та технічних вимог операцій легкої промисловості була розроблена узагальнена структура силової електромеханічної ударної системи для пресового обладнання цієї галузі. Описана теоретична модель силової електромагнітної ударної системи відображає множину взаємопов'язаних елементів. Вона є складною, цілісною системою з функціональними та інформаційними зв'язками і системою керування.

5). Для ударного методу виконання технологічних операцій легкої

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

промисловості було обґрунтовано вибір циліндричного лінійного електромагнітного двигуна з комбінованим якорем й стопом.

6). Розроблено схеми живлення та керування з ємнісними накопичувачами енергії, які забезпечують роботу силової електромеханічної ударної системи відповідно до технічних вимог технологічних операцій легкої промисловості.

7). Розроблено пристрій з двохкоординатною системою руху та електромагнітним приводом для ударної перфорації й маркування деталей.

8). Впровадження розробленого обладнання на підприємствах дозволить автоматизувати технологічні процеси, скоротивши час їх виконання на 50%. Це призведе до підвищення якості готової продукції та зменшення енерговитрат у 2-3 рази. Використання пристроїв з числовим програмним керуванням стає особливо актуальним для виконання операції перфорування деталей при виробництві невеликих партій продукції та індивідуальних замовленнях.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Поліщук О. С. Електромеханічне пресове обладнання на підприємствах легкої промисловості: монографія. – Хмельницький: Видавництво PolyLux, 2018. – 285 с.
2. Ізовіт Т. Л. Імплементация угоди про асоціацію між Україною та ЄС у галузі легкої промисловості / Т. Л. Ізовіт // Вісник КНУТД. – 2015. – №5. – С. 124–127.
3. Skyba M. Improvement of press-forms for polymeric items moulding / M. Skyba, O. Synyuk // Archives of foundry. Polish Academy of Sciences branch Katowice foundry commission, Katowice (Poland), 2004. – V. 4. – № 12. – P. 235-248.
4. Гавриленко Т. В. Перспективи розвитку легкої промисловості України в умовах нестабільного зовнішнього середовища / Т. В. Гавриленко, І. В. Бродюк // Економічні горизонти. – 2018. – №1. – С. 28–34.
5. Кармаліта А. К. Перспективи застосування магнітно-імпульсної обробки для виконання технологічних операцій легкої промисловості / А. К. Кармаліта, Д. В. Прибега, О. С. Поліщук // Вісник Технологічного університету Поділля. Технічні науки. – 2002. – № 1. – С. 94–97.
6. Поліщук О.С. Перспективи застосування лінійних індукційно-динамічних двигунів в якості приводу пресового обладнання для виконання технологічної операції вирубування деталей взуття / О. С. Поліщук, Є. Р. Пильник, Д. В. Прибега, А. К. Кармаліта // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2006. – № 2. – Т. 2. – С. 203–205.
7. Поліщук О. С. Пресове обладнання з підвищеними енергетичними характеристиками для виконання операцій вирубування та перфорації деталей взуття в легкій промисловості / О. С. Поліщук // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки, 2018. – №4. – С. 22-29.
8. Рич М. В. Реформування національної системи технічного регулювання на прикладі промислових підприємств, що виробляють засоби захисту працюючих (ЗІЗ)

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

/ М. В. Рич // Вісник НТУ «ХП»: зб. наук. пр. Темат. вип.: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2010. – № 46. – С. 157–165.

9. Поліщук О.С. Дослідження пристрою з електромагнітним приводом для виконання операцій маркування та клеймування деталей одягу та взуття / О.С. Поліщук, А.К. Кармаліта, О.П. Бурмістенков // Вісник Херсонського національного технічного університету, 2018. – №4. – С. 277-288.

10. Поліщук О.С. Аналіз механічних моделей і аналітичних залежностей для опису матеріалів для виробництва виробів легкої промисловості / О.С. Поліщук, О.П. Бурмістенков, А.К. Кармаліта, Л.В. Солодєва // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Т. Шевченка, 2018. – Вип. №62. – С. 57-66.

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

12. Polishchuk O. The increase of efficiency of metal fittings installing operation in light industry products / O. Polishchuk, O. Burmistenkov, N. Pyshcheniuk, M. Matuszewski //Postępy w inżynierii mechanicznej. Czasopismo naukowo-techniczne, 2018. – №11(6). – S.53-66.

13. Matuszewski M. Styp-rekowski Rozwój obrabiarek skrawających – aktualne trendy. Obróbka Metalu / M. Matuszewski, I.L. Oborski, O. Polishchuk, M. //Kwartalnik naukowo-techniczny, 2018. – №1. – S.11-17.

14. Polishchuk O. Device with two-coordinate movement system for impact perforation and marking of parts and products / O. Polishchuk, A. Polishchuk, N. Pyshcheniuk // Projektowanie Mechatroniczne Zagadnienia Wybrane. Praca zbiorowa pod redakcją Michała Mańka/ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, 2018. – S.219-226.

15. Yakymchuk D. Economic efficiency of textile materials cutting designer costumes of hospitality facilities / D. Yakymchuk, O. Dzyundzya, V. Burak, I. Shvets, Yu. Shvets, N. Myrhorodska, O. Polishchuk, D. Karneyenka, S. Krasner // Fibres and Textiles, 2018. – №4. – P.90-93.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

16. Кравчук О.А. Модель пластичної деформації полімерного матеріалу / О. Синюк, О. Кравчук, А. Кравчук, В. Магдін, І. Золотенко // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький : ХНУ, 2023, №1. - С.186-195

17. Polishchuk A.O. Equipment for processing pet bottles into raw materials for the screw extruder of the 3D printer / A.O. Polishchuk, M.Ye. Skyba, O.S. Polishchuk // Матеріали VI Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування»: Збірник матеріалів, 21 грудня, 2023 р. – Полтава: ПДАУ, 2023.

18. Zozulia P. Development and investigation of device for processing polymer materials by 3D-printing method / P. Zozulia, O. Polishchuk, N. Kostyuk, A. Polishchuk // Ukrainian journal of mechanical engineering and materials science. 2019. Vol. 5, No. 3–4. P. 25–31.

19. Polishchuk O. Development and research of equipment for processing of granulated polymeric materials via 3d printing for the needs of light industry / O. Polishchuk, P. Zozulia, A. Polishchuk, P. Maidan, M. Skyba, N. Kostyuk, A. Kravchuk and O. Kravchuk // Fibres and Textiles. 2020. № 4. P. 75–80.

20. Polishchuk A. Production of details of difficult designs of footwear and clothes with use of technologies of additive production / A. Polishchuk, A. Slavinska, O. Polishchuk, V. Mytsa // AIP Conference Proceedings. 2023. Volume 2889. Issue 17.

21. Поліщук А.О. Розробка конструкції шнекового екструдера 3D-принтера, що використовує гранули або подрібнені частки полімеру в якості вихідної сировини / А.О. Поліщук // Технології та інжиніринг. 2023. № 5. С. 33–49.

22. Йохна М.А. Розробка методики пошуку оптимальних параметрів нелінійних моделей для систем управління ефективністю діяльності підприємств / М.А. Йохна, Ю.Б. Михайловський, Е.О. Янковець // Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки. 2011. № 2. Т. 1. С. 39–43.

23. Поворознюк А.І. Методологія та організація наукових досліджень: навч. посіб. / А.І. Поворознюк, В.І. Панченко, А.Є. Філатова. Харків: «НТМТ», 2016. 192 с.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

24. Поповіченко С. А. Розробка структурної схема гідравлічних приводів взуттєвих машин / С. А. Поповіченко, В. В. Дударенко, А. А. Король, В. В. Масюта, Ю. М. Литвинчук, Є. А. Шиян // Технології та дизайн. – 2018. – № 4. – С. 1–6.

25. Лапач С.М. Теорія планування експериментів: Виконання розрахунково-графічної роботи [Електронний ресурс] / С.М. Лапач. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 86 с.

26. Назаренко Л.А. Конспект лекцій з курсу «Планування і обробка результатів експерименту» / Л.А. Назаренко. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2018. 163 с.

27. Поліщук О.С. Наукові основи проектування електромеханічного пресового обладнання легкої промисловості: дис... д-ра техн. наук: 05.05.10 / Київський національний ун-т технологій та дизайну. К., 2019. 372 с.

28. 3. D. Kravchuk. Study of the process of piercing materials with the use of specialized software LabVIEW/ P. Maidan, V. Grudinin, O. Polishchuk, D. Kravchuk, S. Matiukh, M. Bonekf// Збірник праць Міжнародної студентської наукової конференції «Talent Detector2023\_Winter», Сілезький технологічний університет, м. Глівіце, Польща, 27 січня 2023 р. - С.330-337

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

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

31. Z.S. Wu. Three-Dimensional Graphene-Based Macro- and Mesoporous Frameworks for High-Performance Electrochemical Capacitive Energy Storage / Z.S. Wu, Y. Sun, Y.Z. Tan, S. Yang, X. Feng, K. Mullen // Journal of American Chemical Society. – 2012. – №48. – Volume 134. – P. 532–535.

32. Поліщук О. С. Розробка схем живлення і керування силовими електромеханічними ударними системами в пресовому обладнанні легкої

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

промисловості / О. С. Поліщук // East European Scientific Journal. – 2019. – № 1. – Part 1. – P. 22–28.

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

34. Білий Л.А. Ферорезонансні режими роботи синхронних машин / Л.А. Білий, О.С. Поліщук, С.П. Лісевич, А.О. Поліщук // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – Х.: НТУ «ХПІ», 2020. – №3. – С.51-56.

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

36. Чумакова С. В. Експериментальна установка для дослідження електромагнітного приводу пристрою для встановлення металевої фурнітури у виробі легкої промисловості / С. В. Чумакова, О. С. Поліщук // Матеріали X Всеукраїнської наукової конференції молодих вчених та студентів «Наукові розробки молоді на сучасному етапі» (19 – 20 квітня 2011). – К.: КНУТД, 2011. – Т.ІІ. – С. 16–17.

37. Чумакова С. В. Стенд для дослідження пристрою з електромагнітним приводом для встановлення металевої фурнітури у виробі легкої промисловості / С. В. Чумакова, О. С. Поліщук, А. К. Кармаліта // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «IV Українсько-Польські наукові діалоги» (11 – 14 жовтня 2011). – Хмельницький-Яремче: ХНУ, 2011. – С. 136.

38. Поліщук О. С. Стенд для дослідження пристрою з електромагнітним приводом для встановлення металевої фурнітури у виробі легкої промисловості / О. С. Поліщук, С. В. Чумакова, С. І. Пундик // Наукові нотатки. – 2011. – № 34. – С. 213–218.

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
						82
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

					БРМА24.00.00.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83