

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Розробка конструкції пресового обладнання з
двохсекційним лінійним індукційно-динамічним
ДВИГУНОМ
Назва теми

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Шифр, назва

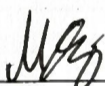
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Шифр, назва

Освітня програма «Електропобутова техніка»

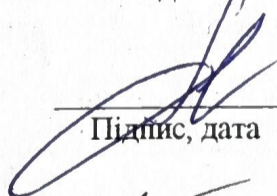
Шифр МРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 2 курсу
група ЕТм-24-1


Підпис

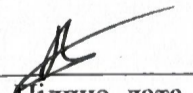
Мартинюк Д.І.
Ініціали, прізвище

Керівник


Підпис, дата

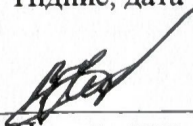
проф. Поліщук О.С.
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер


Підпис, дата

С.І. Луцишин
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:


Підпис, дата

доц. Неймак В.С.
Ініціали, прізвище

Зав. кафедри МАЕЕС

10 12 2025 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

к.т.н., доц. Неймак В.С.

10 . 12 2025р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Мартинюк Давид Іванович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка конструкції пресового обладнання з двохсекційним лінійним індукційно-динамічним двигуном

керівник роботи проф. Поліщук О.С.

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

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

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 10.12.2025

3. Вихідні дані до роботи Технічні характеристики лінійних електричних двигунів

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

Вступ. 1. Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи. 2. Розробка конструкції пресового обладнання з двохсекційним лінійним індукційно-динамічним. 3. Розрахунки, що підтверджують працездатність пресового обладнання з ЛІДД. Висновки. Перелік джерел посилання.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) Аркуш 1. Конструкції двигунів. Документ оглядовий (A1). Аркуш 2. Операції вирубівання та перфорування деталей. Документ технологічний (A1). Аркуш 3. Технічні характеристики ЛІДД. Документ оглядовий (A1). Аркуш 4. Пресове обладнання з ЛІДД. Схема структурна (A1). Аркуш 5. Пресове обладнання з ЛІДД. Складальне креслення (A1). Аркуш 6. Блок живлення. Схема електрична принципова (A1). Аркуш 7. Пресове обладнання з ЛІДД. Документ ілюстраційний (A1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

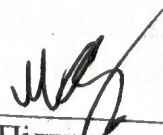
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи	до 28.10.24р.	
2. Розробка конструкції пресового обладнання з двохсекційним лінійним індукційно-динамічним	до 15.11.24р.	
3. Розрахунки, що підтверджують працездатність пресового обладнання з ЛІДД	до 17.11.24р.	
4. Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу	до 12.12.24р.	

Студент


Підпис

Керівник роботи


Підпис

Д.І. Мартинюк
Ініціали, прізвище

О.С. Поліщук
Ініціали, прізвище

АНОТАЦІЯ

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

1. Прізвище, ім'я та по батькові Мартинюк Давид Іванович

2. Тема магістерської роботи Розробка конструкції пресового обладнання з двохсекційним лінійним індукційно-динамічним двигуном

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

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 7 арк., сторінок записки 64

5. Традиційні приводи пресового обладнання - пневматичні, гідравлічні та електромеханічні - мають низьку енергоефективність, значні втрати в проміжних ланках і обмежену швидкодію, що ускладнює їх використання в сучасних виробничих системах. Водночас високоточні цифрові приводи залишаються дорогими й малодоступними для невеликих підприємств. Лінійні індукційно-динамічні двигуни становлять перспективну альтернативу, оскільки забезпечують прямолінійний рух без механічних передач, високу швидкодію та мінімальне споживання енергії в холостих режимах. Це робить їх ефективним рішенням для технологічних операцій вирубкування та перфорації. Тому розробка пресового обладнання з двохсекційним ЛІДД є актуальним завданням, спрямованим на підвищення енергоефективності, точності та доступності сучасних технологічних рішень для підприємств галузевого машинобудування.

В магістерській роботі розроблено конструкцію пресового обладнання з двохсекційним лінійним індукційно-динамічним двигуном. В першому розділі зроблено огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи. В другому здійснено розробку конструкції пресового обладнання з двохсекційним лінійним індукційно-динамічним двигуном. В третьому розділі виконано розрахунки, що підтверджують працездатність пресового обладнання з ЛІДД.

Підпис студента _____

" 10 " 12 20 25 р.

РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 1 від "18" 12 20 25 р.

Оцінка проекту ЕК Відмінно / А / 100

Рекомендації ЕК Впровадження у виробничий процес


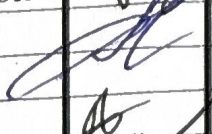

Особливі відмітки -

Технічний секретар _____

" 18 " 12 20 25 р.

ЗМІСТ

	стор.
Вступ	6
1 Огляд та аналіз існуючих технологічних та технічних рішень з тематики магістерської роботи	8
1.1 Загальні відомості про технологію і виробничий процес	8
1.2 Характеристика технологічних операцій галузевого машинобудування, при виконанні яких застосовується обладнання пресової та ударної дії	12
1.3 Порівняння приводів обладнання пресової і ударної дії із зворотно-поступальним рухом робочих органів, яке використовується для виконання технологічних операцій в галузевому машинобудуванні	14
1.4 Загальна характеристика лінійних електричних двигунів та області їх застосування	17
1.5 Огляд патентів та конструкцій по лінійних індукційно-динамічних двигунах	21
1.6 Характеристика лінійного індукційно - динамічного двигуна	25
1.7 Висновки до першого розділу	27
2 Розробка конструкції пресового обладнання з двохсекційним лінійним індукційно-динамічним двигуном	30
2.1 Обґрунтування вибору конструктивної схеми пресового обладнання з двохсекційним лінійним індукційно-динамічним двигуном	30

МРМА25.00.00.000 ПЗ								
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата	Розробка конструкції пресового обладнання з двохсекційним лінійним індукційно-динамічним двигуном Пояснювальна записка	Літера	Аркуш	Аркушів
Виконав		Мартинюк				М	4	64
Перевір.		Поліщук				ХНУ		
Н.контр. Затвер.		Неймак				гр.ЕТм-24-1		

2.2	Розробка структурної схеми пресового обладнання з двосекційним лінійним індукційно-динамічним двигуном	32
2.3	Вихідні дані лінійного індукційно-динамічного двигуна	35
2.4	Розробка конструкції пресового обладнання з двосекційним лінійним індукційно-динамічним двигуном	38
2.5	Принцип роботи пресового обладнання з ЛІДД	42
2.6	Розробка пристрою живлення та управління ЛІДД	44
2.7	Загальний вигляд пресового обладнання з лінійним індукційно-динамічним двигуном	47
2.8	Висновки до другого розділу	49
3	Розрахунки, що підтверджують працездатність пресового обладнання з ЛІДД	52
3.1	Електромагнітний розрахунок ЛІДД	52
3.2	Розрахунок ємнісного накопичувача енергії джерела живлення ЛІДД	55
3.3	Розрахунок пружини повернення	56
3.4	Висновки до третього розділу	59
	Висновки	60
	Перелік джерел посилання	62
	Додаток А	

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку галузевого машинобудування питання енергозбереження та підвищення енергоефективності є одним із ключових чинників конкурентоспроможності виробництва. Зростання вартості енергоресурсів, їх обмеженість, а також висока енергоємність промислових підприємств зумовлюють необхідність впровадження нових технічних рішень, спрямованих на зменшення втрат електричної енергії у технологічних процесах [1]. Виробництво деталей із полімерних та композиційних матеріалів у машинобудуванні потребує високопродуктивного та енергоощадного обладнання, здатного забезпечувати точність та стабільність технологічних операцій.

Висока енергоємність галузевого машинобудування пояснюється значною часткою енергетичних витрат у собівартості продукції, а також суттєвим фізичним зносом обладнання, який часто сягає 65–70 %. Обмежене впровадження енергозберігаючих технологій і сучасних приводних систем призводить до значних втрат електроенергії, особливо під час роботи устаткування у повторно-короткочасних режимах. Виробничі процеси, що включають обробку полімерних і композиційних матеріалів, потребують оптимізації енергоспоживання, оскільки традиційні механічні, гідравлічні та пневматичні приводи характеризуються високими втратами в холостих та перехідних режимах [2].

Технологічні операції вирубування та перфорації деталей з полімерних і композиційних матеріалів, що виконуються у галузевому машинобудуванні, традиційно реалізуються на пресовому обладнанні різних типів. Однак такі системи мають підвищену інерційність, складність у регулюванні та потребують значних витрат електроенергії навіть за відсутності технологічного навантаження. Це створює передумови для вдосконалення приводних систем і переходу до технологій, що споживають електроенергію лише в момент безпосереднього виконання технологічної операції.

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

Лінійні індукційно-динамічні двигуни (ЛІДД) є одним із найбільш перспективних рішень для приводів пресового обладнання в галузевому машинобудуванні. Вони забезпечують прямолінійний рух робочого органа без проміжних механічних передач, характеризуються високою швидкістю, точністю регулювання та низькими енергетичними втратами у холостих режимах. Завдяки електромагнітному принципу дії такі двигуни дозволяють досягти підвищеної продуктивності та точності операцій вирубання та перфорації деталей із полімерних і композиційних матеріалів [3].

Метою роботи є розробка та проектування високоефективного пресового обладнання для галузевого машинобудування, у якому приводом є лінійний індукційно-динамічний двигун. Розроблюване обладнання призначене для виконання технологічних операцій вирубання та перфорації полімерних і композиційних матеріалів, забезпечуючи при цьому значне зменшення енерговитрат, підвищення точності позиціонування та зниження інерційності робочого процесу.

Актуальність розробки визначається потребою галузевого машинобудування у модернізації пресового обладнання, зниженні енергоємності технологічних операцій вирубання та перфорації полімерних і композиційних матеріалів, а також впровадженні енергозберігаючих електромагнітних приводів, що споживають електроенергію виключно під час виконання технологічної операції та забезпечують високу ефективність і надійність виробничого процесу.

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

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

1.1 Загальні відомості про технологію і виробничий процес

Технологія та виробничий процес є базовими поняттями сучасного галузевого машинобудування, оскільки вони визначають структуру, логіку та взаємозв'язки між операціями, спрямованими на отримання деталей із заданими параметрами якості. У машинобудуванні, зокрема в обробці полімерних і композиційних матеріалів, технологія формує основу для проектування обладнання, вибору методів оброблення, визначення силових, енергетичних та кінематичних режимів [4]. Застосування полімерів і композитів у конструкціях сучасних машин зумовлено їх високою питомою міцністю, зносостійкістю, корозійною стійкістю та можливістю формування складних конфігурацій, що робить технологію їх обробки актуальною та науково важливою.

Технологічний процес у машинобудуванні визначає послідовність операцій, пов'язаних із формуванням заготовок, обробленням поверхонь, створенням функціональних елементів і підготовкою деталей до збирання. Він формується на основі закономірностей взаємодії інструмента та матеріалу, враховує умови навантаження, пружні та пластичні властивості матеріалу, температурні ефекти та вплив швидкісних режимів [5]. Для полімерних і композиційних матеріалів ці чинники мають особливе значення через їхню анізотропію, чутливість до температури, схильність до розшарування та залежність міцності від напрямку армування волокон.

У виробництві деталей із полімерів і композитів важливим етапом є формування контурів та структурних елементів за допомогою операцій вирубування й перфорації. Ці процеси забезпечують точну геометрію елементів та стабільність параметрів заготовок, необхідних для подальших технологічних операцій. Виконання таких операцій потребує застосування обладнання з високою динамічністю,

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

точністю позиціонування та можливістю роботи в повторно-короткочасних режимах. Традиційні механічні та гідравлічні преси мають значні енергетичні втрати в холостому режимі, що знижує їх ефективність. Саме тому актуальним є впровадження електромагнітних приводів нового покоління, зокрема лінійних індукційно-динамічних двигунів (ЛІДД), що забезпечують миттєве прикладання зусилля та високу енергоефективність [6].

Технологія оброблення полімерних і композиційних матеріалів характеризується поєднанням механічних, електрофізичних і термомеханічних впливів. У процесах вирубування та перфорації застосовується локалізоване ударне чи імпульсне навантаження, що сприяє формуванню чітких контурів без порушення структури волокон. Використання ЛІДД у пресовому обладнанні дозволяє оптимізувати кінематичні параметри, скоротити цикл формоутворення та забезпечити малу тривалість контакту інструмента з матеріалом, що особливо важливо при роботі з композитами [7].

Таким чином, технологія у машинобудуванні є комплексною системою знань про закономірності оброблення матеріалів, методи формоутворення та принципи вибору обладнання. Її розвиток визначає продуктивність, точність і якість виготовлення деталей, а також рівень енергоефективності виробництва. Розуміння цих закономірностей є основою для створення нових пресових машин і приводів, здатних забезпечити сучасні вимоги машинобудівного виробництва.

1.1.1 Сутність та види технології

Сутність технології в галузевому машинобудуванні полягає у створенні та реалізації методів перетворення матеріалів у деталі з потрібними параметрами точності, якості та функціональності. Технологія формування деталей з полімерних і композиційних матеріалів ґрунтується на закономірностях механічної дії інструмента на матеріал, особливостях руйнування полімерної матриці, поведінці армувальних волокон та умовах мінімізації залишкових напружень [5].

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

Види технології у машинобудуванні класифікуються залежно від характеру оброблення, фізичних механізмів впливу та особливостей взаємодії інструмент–матеріал. Основними видами технології є: механічна, термічна, фізико-хімічна та електрофізична. Механічна технологія, у межах якої виконуються вирубвання й перфорація, передбачає безпосередній контакт інструмента з матеріалом та формоутворення під дією зусилля. У роботі з композитами додатково враховуються ефекти анізотропії, різниця у модулі пружності волокон і матриці, а також схильність до деламінації.

Особливої уваги потребує технологія імпульсного прикладання зусилля, яка є найбільш ефективною при вирубванні та перфорації полімерних та композиційних матеріалів. Імпульсне навантаження забезпечує різке зростання сили протягом короткого часу, що сприяє швидкому руйнуванню матеріалу у зоні контакту і формуванню чистої кромки отвору або контуру [6]. Важливою особливістю імпульсних технологій є потреба у приводах із високою швидкодією та можливістю точного контролю параметрів імпульсу — саме цими характеристиками володіють індукційно-динамічні двигуни.

Види технологій також розрізняються за рівнем автоматизації — від ручної і механізованої до автоматизованої та роботизованої. Використання електромагнітних лінійних приводів забезпечує можливість легкої інтеграції у автоматизовані комплекси, що відповідає сучасним тенденціям розвитку галузевого машинобудування.

1.1.2 Класифікація виробничих процесів

Виробничі процеси у машинобудуванні класифікують за різними ознаками: характером впливу на матеріал, призначенням, рівнем автоматизації та типом обладнання. Основні виробничі процеси, що забезпечують безпосереднє формування деталей, включають механічні, термічні, хімічні та електрофізичні про-

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

цеси. Допоміжні процеси охоплюють ремонт обладнання, заточування інструменту та контроль параметрів, а обслуговуючі — транспортування, зберігання та енергозабезпечення [8].

Механічні виробничі процеси мають найбільше значення при формоутворенні полімерних і композиційних матеріалів. До них належать вирубування, перфорація, різання, фрезерування, формування та штампування. У машинобудуванні саме процеси вирубування й перфорації забезпечують високу точність і повторюваність формових елементів. Імпульсні та ударні процеси вважаються оптимальними для композитів, оскільки вони зменшують ризик розшарування та нерівномірного руйнування матриці.

За типом обладнання виробничі процеси поділяють на процеси із застосуванням механічних, гідравлічних, пневматичних та електромагнітних приводів. У сучасних виробничих системах усе більшого поширення набувають електромагнітні та лінійні приводи, які забезпечують високу швидкодію, точність та низьке енергоспоживання завдяки відсутності проміжних механічних передач [4].

За рівнем автоматизації процеси поділяються на ручні, механізовані, автоматизовані та роботизовані. У галузевому машинобудуванні зростає потреба саме в автоматизованих системах, що дозволяють підвищити продуктивність і якість продукції, а також забезпечити стабільність технологічного процесу. Лінійні індукційно-динамічні приводи органічно інтегруються у такі системи, оскільки забезпечують просте керування, високу динамічність та енергоефективність.

Таким чином, класифікація виробничих процесів дозволяє системно аналізувати технологічні рішення та обґрунтовувати вибір обладнання для виконання операцій вирубування й перфорації полімерних і композиційних матеріалів у галузевому машинобудуванні.

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

1.2 Характеристика технологічних операцій галузевого машинобудування, при виконанні яких застосовується обладнання пресової та ударної дії

Технологічні операції галузевого машинобудування охоплюють значний спектр способів оброблення матеріалів, спрямованих на отримання заготовок і деталей із заданими формою, розмірами, структурою та фізико-механічними властивостями. Однією з найбільш поширених груп технологічних процесів є операції, що виконуються із застосуванням обладнання пресової та ударної дії. Таке обладнання забезпечує формоутворення в результаті прикладання до заготовки контрольованого зусилля, яке може бути статичним, імпульсним або ударним залежно від вимог виробництва та характеристик матеріалу. У машинобудуванні пресові й ударні технології використовують для оброблення широкого спектра матеріалів, включаючи метали, полімери, композиційні матеріали, порошкові суміші та інші конструкційні системи, що потребують деформування чи локального руйнування для зміни форми або створення функціональних елементів [9].

У загальному вигляді пресові технології є процесами оброблення тиском, у яких зусилля передається на заготовку через робочий інструмент — пуансон, штамп, ніж або матрицю. Ці процеси забезпечують точність контурів, повторюваність форми, високу продуктивність та можливість виготовлення деталей складної конфігурації. До пресових операцій належать вирубування, перфорація, пробивання, розкроювання, штампування, пресування порошкових матеріалів, гнуття, обтискання, правка та інші способи деформаційного впливу. Характер прикладного навантаження визначає вибір обладнання — механічні, гідравлічні, гідравліко-механічні чи електромагнітні преси. У галузевому машинобудуванні важливим є поєднання високої точності, енергоефективності та можливості роботи в циклічних режимах, тому все більшого поширення набувають імпульсні та швидкодіючі пресові системи [10].

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

Ударні технологічні операції, на відміну від статичних пресових, характеризуються коротким у часі, але значним за величиною імпульсом сили, що дозволяє здійснювати локальне руйнування або деформацію матеріалу. Вони застосовуються для пробивання отворів, оброблення товстошарових композиційних матеріалів, формування контурів жорстких полімерних деталей, підготовки країв під монтажні елементи, а також для операцій, що потребують швидкого та різкого навантаження. Ударні пристрої включають молоти, кувальні преси, пневматичні та електромагнітні ударні системи. Перевагою ударної дії є можливість виконання операцій за мінімальний час і з високою локалізацією прикладеної сили, що важливо при роботі з композитами, які є чутливими до повільних та рівномірних навантажень через ризик розшарування [11].

Обладнання пресової та ударної дії охоплює широкий набір машин — від традиційних кривошипних та ексцентрикових пресів до гідравлічних і пневматичних установок, а також сучасних високошвидкісних електромагнітних приводів. Кожен тип обладнання має свої переваги та обмеження. Наприклад, механічні преси забезпечують жорстку кінематику й високу повторюваність, але мають підвищене енергоспоживання у холостих режимах. Гідравлічні системи дозволяють досягати значних зусиль при плавному керуванні, однак вони інерційні та потребують складної системи обслуговування. Пневматичні пресові та ударні установки відзначаються швидкодією, але їх точність залежить від параметрів робочого середовища. Сучасні технології машинобудування передбачають використання електромагнітних приводів, зокрема лінійних індукційно-динамічних систем, які забезпечують миттєве формування імпульсу сили та мінімізацію енерговитрат за рахунок відсутності механічних передач і холостого ходу [12].

Вибір технологічної операції та типу обладнання визначається низкою факторів, зокрема механічними характеристиками матеріалу, товщиною заготовки, складністю контуру, вимогами до продуктивності, точністю та чистотою обробленої поверхні. Для полімерних і композиційних матеріалів найбільш ефективними є імпульсні процеси, оскільки вони забезпечують короткочасний вплив із

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

високою швидкістю наростання сили. Це дозволяє уникнути порушення структури волокон, надмірного нагрівання або пластичного руйнування матриці. Саме тому обладнання пресової та ударної дії є базовим елементом технологічних ліній сучасного галузевого машинобудування, особливо у виробництві деталей, що потребують високої точності та стабільності геометричних параметрів.

Загалом технологічні операції, у яких застосовується пресове й ударне обладнання, відіграють ключову роль у формуванні заготовок і деталей у машинобудуванні. Вони забезпечують не лише необхідні геометричні параметри виробів, але й оптимізують виробничий процес завдяки високій продуктивності, можливості автоматизації та адаптації до роботи з різними конструкційними матеріалами, включаючи полімери та композити. Уміння обирати раціональні режими оброблення, тип приводу та конструкцію пресового обладнання визначає якість кінцевого виробу та ефективність усього виробничого циклу.

1.3 Порівняння приводів обладнання пресової і ударної дії із зворотно-поступальним рухом робочих органів, яке використовується для виконання технологічних операцій в галузевому машинобудуванні

У галузевому машинобудуванні обладнання пресової та ударної дії зі зворотно-поступальним рухом робочих органів відіграє ключову роль у виконанні операцій формоутворення, вирубування, перфорації, обтискання, клепання, пробивання та інших видів деформаційного оброблення матеріалів. Для реалізації цих операцій застосовуються різні типи приводів - електромеханічні, гідравлічні, пневматичні та електромагнітні (лінійні). Кожен із них має свої конструктивні, енергетичні, експлуатаційні та динамічні особливості, що визначають сферу їх ефективного застосування у виробничих системах. Сучасні дослідження доводять, що вибір приводу значною мірою впливає на точність позиціонування, швидкість циклу, енергоефективність, надійність і рівень автоматизації обладнання [13].

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

Електро механічні приводи традиційно використовуються в машинах ударної та циклічної дії. Вони забезпечують високу керованість, гнучкість режимів, точність позиціонування та можливість інтеграції з електронними системами керування. Дослідження показують, що коефіцієнт корисної дії електро механічних систем зазвичай вищий, ніж у гідравлічних та пневматичних приводів, що зумовлено меншим числом етапів перетворення енергії [14]. Однак електро механічні приводи мають і обмеження: довгі кінематичні ланцюги, наявність проміжних механічних передач, підвищені вимоги до змащування, нерівномірність навантаження в циклі та зниження ресурсу при ударних режимах роботи. Тому в галузевому машинобудуванні вони частіше застосовуються у машинах для маркування, клепання, встановлення кріпильних елементів, а також у легких ударних пресах.

Гідравлічні приводи належать до найбільш поширених у силових пресових машинах завдяки здатності створювати значні зусилля при компактних розмірах силових елементів. Гідропривід дозволяє реалізувати великі хода повзуна, забезпечує плавність руху, можливість безступінчастого регулювання швидкості в широкому діапазоні та високий рівень керованості. Його переваги підтверджуються сучасними технічними оглядами та експериментальними дослідженнями, які підкреслюють універсальність та енергоємність гідросистем у процесах глибокого витягування, пресування та вирубування конструкційних матеріалів [15]. Разом із тим гідравлічні приводи характеризуються значною складністю конструкції, високою вартістю виготовлення й експлуатації, потребують систематичної заміни й фільтрації робочої рідини, а також герметизації вузлів. Втрата герметичності призводить до протікань, забруднення обладнання та зниження точності роботи, що потребує регулярного технічного обслуговування.

Пневматичні приводи за принципом дії близькі до гідравлічних, але використовують стиснуте повітря як робоче середовище. Основними їх перевагами є висока швидкодія, надійність, простота конструкції, низькі експлуатаційні витрати та швидкість запуску. Проте можливість створення силового навантаження у пневмоприводів обмежена, оскільки збільшення зусилля потребує збільшення

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

діаметра пневмоциліндра, що робить систему громіздкою. Дослідження ексергетичної ефективності пневматичних приводів показують, що їх загальний ККД є нижчим, ніж у електромеханічних систем, а характер стискування повітря може викликати ударні навантаження при реверсуванні [16]. Через це пневматичні приводи доцільно використовувати в машинах з малими технологічними навантаженнями, а також у процесах, де вимоги до точності позиціонування є помірними.

Усі три типи традиційних приводів - електромеханічний, гідравлічний і пневматичний - мають спільний недолік: вони споживають електричну енергію не лише під час робочого ходу, але й у холостих режимах, під час підготовчих операцій, завантаження та розвантаження обладнання. У пресових машинах циклічного типу, де тривалість робочого імпульсу становить лише 10–30% від загального циклу, середній відсоток холостих ходів може досягати 70–90%. Це значно знижує енергоефективність і призводить до надмірного зношування приводних систем.

З огляду на це в галузевому машинобудуванні зростає інтерес до застосування приводів, здатних забезпечувати пряме перетворення електричної енергії в кінетичну енергію зворотно-поступального руху робочого органу. Лінійні електричні двигуни, зокрема індукційно-динамічні та інші форми електромагнітного приводу, дають можливість відмовитися від проміжних механічних передач, зменшити втрати енергії, знизити інерційність системи й підвищити точність виконуваних операцій. Такі приводи працюють лише в момент формування імпульсу сили та не споживають енергію в періоди холостих ходів, що є принциповою перевагою над традиційними системами. Електромагнітні лінійні приводи забезпечують високу швидкість наростання зусилля, компактність, можливість гнучкого керування та оптимальну адаптацію до автоматизованих виробничих систем.

Підсумовуючи порівняння традиційних приводів, можна зазначити, що гідравлічні системи забезпечують найбільше зусилля, пневматичні - найвищу швидкодію, електромеханічні - найкращу керованість, але лише лінійні електричні приводи дозволяють уникнути багатоступеневого перетворення енергії та досягти

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

максимальної енергетичної ефективності при роботі обладнання пресової й ударної дії в галузевому машинобудуванні.

1.4 Загальна характеристика лінійних електричних двигунів та області їх застосування

Лінійні електричні двигуни становлять окремий клас електричних машин, який істотно відрізняється від традиційних двигунів обертової дії як за конструкцією, так і за принципом енергетичного перетворення. На відміну від електричних машин, що здійснюють безперервний обертальний рух та передають енергію через вал, лінійні електричні двигуни формують безпосередній поступальний або зворотно-поступальний рух із дискретним перетворенням електричної енергії в механічну. Саме ця особливість дозволяє застосовувати їх у технологічних процесах, де потрібні високі швидкодії, значні прискорення, точне регулювання ходу та можливість формування руху без посередництва механічних передач [17].

Принцип дії кожного типу лінійного двигуна визначає його конструктивні особливості, динамічні параметри та сфери доцільного застосування. В узагальненому вигляді найбільш поширені в електроприводі такі типи лінійних електричних двигунів: електромагнітні, індукційні, електродинамічні, магнітоелектричні, індукційно-динамічні, магнітострикційні та електрострикційні. Кожен тип має свою фізичну природу формування тягового зусилля, що відображається на питомій потужності, коефіцієнті корисної дії, робочому ході й граничних навантаженнях [17].

Найважливішими технічними параметрами, що характеризують роботу лінійних електричних двигунів, є: величина створюваного тягового зусилля, амплітуда динамічного переміщення, частота робочих ходів, прискорення, коефіцієнт корисної дії, питома корисна потужність та питома сила тяги. У роботі [17] наведені орієнтовні граничні значення цих параметрів, визначені на основі аналізу промислових двигунів і експериментальних зразків. Узагальнені дані наведено в

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

таблиці 1.1, що дозволяє порівняти різні типи лінійних двигунів за їх технологічним потенціалом.

Таблиця 1.1 - Орієнтовні граничні параметри лінійних електричних двигунів

Тип лінійних електричних двигунів	Параметри лінійних електричних двигунів					
	Тягове зусилля, Н	Переміщення, м	Частота ходів, Гц	Прискорення, м/с ²	Питома корисна потужність, Вт/кг	Питома сила тяги, Н/кг
Електромагнітний	15x10 ⁴	2	600	10 ⁵	50	3x10 ³
Індукційний	7x10 ⁴	Не обм.	200	10 ⁶	4	8
Електродинамічний	45x10 ⁴	0,3	15x10 ³	5x10 ⁴	5	20
Магнітоелектричний	10 ³	3x10 ⁻²	15x10 ³	5x10 ⁴	3	1
Індукційно-динамічний	15x10 ⁵	5x10 ⁻²	60	5x10 ⁴	85	4x10 ³
Магнітострикційний	60x10 ⁴	4x10x ⁻³	3x10 ⁴	10 ⁻¹	0,5	50
Електрострикційний	10 ²	10 ⁻³	15x10 ³	10 ⁻¹	10 ²	5x10 ²

Лінійні електромагнітні двигуни (ЛЕМД) працюють на основі взаємодії магнітного поля котушки з феромагнітним осердям, яке здійснює прямолінійний рух. Найбільше їх застосування припадає на пресові машини та устаткування ударної дії, що реалізовані у промисловості. ЛЕМД позбавлені проміжних механічних передач, що значно підвищує надійність і зменшує знос. Основними перевагами є простота конструкції, широкий діапазон регулювання зусилля та частоти ходів, легкість інтеграції у автоматизовані системи керування, стабільність роботи та практично повний захист від перевантажень. Технологічна гнучкість робить ці двигуни одним із найпоширеніших типів серед машин лінійної дії.

У лінійних індукційних двигунах (ЛІД) робочий рух формується взаємодією змінного магнітного поля індуктора з вихровими струмами, індукованими в рухомій частині. Перевагами ЛІД є можливість отримання необмежених переміщень та високих швидкостей. Проте значний недолік - велика маса та складність конструкції - унеможливив їх широке промислове застосування. Історично перші конструкції ЛІД використовувалися як приводи машин ударної дії, проте низький коефіцієнт корисної дії та недостатня питома сила тяги призвели до згортання таких розробок. У приводах пресових машин ЛІД практично не застосовуються саме через низьку питому тягу з одиниці активної поверхні індуктора, що унеможлиблює конкуренцію з гідравлічними, електромеханічними та електромагнітними приводами [17].

Електродинамічні двигуни (ЛЕДД) використовують сили взаємодії магнітних полів, створюваних струмами в нерухомих та рухомих котушках. До їх переваг належать висока швидкодія та значні питомі значення корисної потужності. Недоліком є низький ККД та незадовільна ударна міцність елементів рухомої частини, що обмежує можливість використання ЛЕДД у приводах пресового устаткування. Збільшення габаритів, вартості та зниження надійності спричиняють недоцільність застосування цього типу двигунів у технологічних машинах ударної дії.

Лінійні магнітоелектричні двигуни (ЛМЕД) працюють на принципі взаємодії постійних магнітів із магнітним полем котушки. Основним стримуючим чинником для їх промислового впровадження є обмежена доступність та висока вартість матеріалів постійних магнітів, низька питома потужність та недостатня надійність у тяжких режимах. Проте прогрес у галузі магнітних сплавів свідчить про потенційну можливість розширення сфери їх застосування, оскільки сучасні матеріали здатні забезпечувати вищу питому магнітну енергію, ніж традиційні електромагніти [17].

Магнітострикційні (ЛМСД) та електрострикційні (ЛЕСД) двигуни перетворюють енергію за рахунок деформацій сегнето- та ферромагнітних матеріалів під

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						19
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

дією електричних або магнітних полів. Вони відзначаються компактністю, простотою конструкції та високою питомою корисною роботою, проте мають дуже обмежений робочий хід (до 2 мм) і малу тягову силу. Саме тому у приводах пресового обладнання ЛМСД і ЛЕСД практично не знаходять застосування.

Найбільший інтерес для пресового та ударного обладнання становлять лінійні індукційно-динамічні двигуни (ЛІДД), принцип дії яких базується на взаємодії імпульсного магнітного поля індуктора із полем короткозамкненого витка. Поєднання електромагнітних та електродинамічних сил забезпечує ЛІДД високу швидкість, значну питому потужність та підвищений коефіцієнт корисної дії. Недоліком є обмежена довжина робочого ходу, проте для ударних технологічних операцій цього цілком достатньо. За техніко-економічними показниками ЛІДД дозволяють створювати приводи з енергією удару до $1 \cdot 10^3$ Дж, що робить їх перспективними для пресового обладнання нового покоління [17].

Порівняльний аналіз граничних характеристик, наведених у таблиці 1.1, показує, що саме індукційно-динамічні двигуни мають найкращі питомі показники – тягову силу, питому потужність та питому силу тяги. Крім того, їх дискретне енергетичне перетворення забезпечує мінімальні витрати електроенергії, оскільки привід споживає енергію лише під час виконання робочого ходу. Це робить ЛІДД оптимальними для обладнання, яке працює переважно в імпульсних або циклічних режимах.

Незважаючи на значні перспективи ЛІДД, їх використання в промисловому обладнанні довгий час залишалося обмеженим. Відсутність серійного виробництва, недосконалість методик розрахунку та проектування, а також використання випадкових або застарілих прототипів призводили до створення неефективних, громіздких і ненадійних конструкцій. Саме тому подальші дослідження, узагальнені в роботі [17], спрямовані на створення науково обґрунтованих підходів до проектування та оптимізації устаткування, оснащеного індукційно-динамічними приводами.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

1.5 Огляд патентів та конструкцій по лінійних індукційно-динамічних двигунах

Для визначення того, які саме типи лінійних електричних двигунів знайшли найбільше використання як приводи пресового та ударного устаткування, було проведено цілеспрямований патентний і літературний пошук [18–22]. Аналіз здійснювався на основі матеріалів Державного департаменту інтелектуальної власності України, міжнародних патентних баз та відкритих джерел мережі Інтернет. Особливу увагу приділено технічним рішенням, реалізованим у конструкціях лінійних електромагнітних та індукційно-динамічних двигунів, які використовуються в силових машинах для технологічних операцій ударної й пресової дії.

Проведений огляд показав, що найбільша кількість технічних рішень і патентів зосереджена у сфері лінійних електромагнітних двигунів та пресового обладнання на їх основі. Активними патентовласниками є розробники з Китаю, Японії, США та Польщі, що підтверджується патентами [18–21]. Натомість кількість патентів, присвячених лінійним індукційно-динамічним двигунам (ЛІДД), порівняно невелика. Це пояснюється тим, що ЛІДД ще не набули широкого поширення у промисловості через складність створення ефективних зразків та обмежену кількість фундаментальних досліджень у цій сфері.

Особливий інтерес становлять патенти, в яких реалізовано способи збільшення зусилля, формування ударного імпульсу та підвищення питомої енергонасиченості приводу. Наприклад, у патенті Китаю [18] представлено конструкцію електромагнітного преса з імпульсним формуванням магнітного поля, що забезпечує ударну дію на робочий орган. У патенті Польщі [19] описано лінійний електромагнітний двигун з підвищеною динамічною жорсткістю, призначений для робочих циклів високої частоти. Патент Японії [20] подає інноваційні вузли, у яких використано лінійні електромагнітні приводи в системах точного позиціону-

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

вання оптичного обладнання. У свою чергу, патент США [21] демонструє використання лінійного електромагнітного двигуна в паливних інжекторах, де потрібна висока швидкодія і точність керування.

Певний інтерес становлять українські патентні розробки, серед яких окреме місце займає патент [22], присвячений пресу для вирубування деталей взуття. У ньому реалізовано конструкцію індукційно-динамічного приводу зі статором і рухомих якорем, з'єднаним зі штоком ударника. Двигун працює в імпульсному режимі і передає енергію безпосередньо на різальний інструмент, що дозволяє здійснювати вирубування з високою швидкістю та мінімальним споживанням електроенергії у неробочих циклах.

Під час аналізу також були розглянуті відомі конструкції індукційно-динамічних приводів. Однією з них є пристрій (рис. 1.1), що використовує нерухома закріплену обмотку збудження та рухомий якір з короткозамкненими кільцевими елементами.

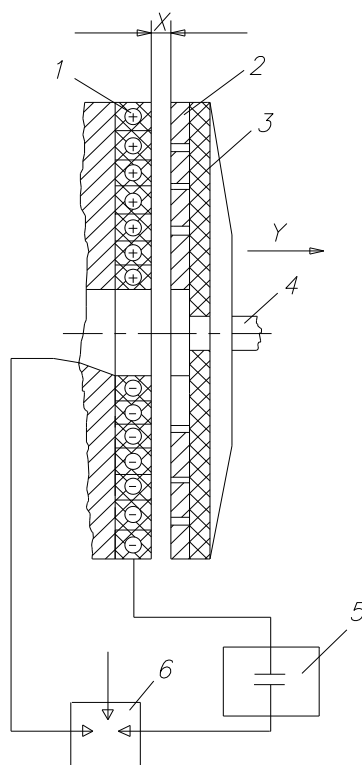


Рисунок 1.1 - Індукційно-динамічний привод

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА25.00.00.000 ПЗ

Арк.

22

пресового обладнання практично не розроблялися. Це вказує на існуючий науково-технічний вакуум у напрямі створення високоефективних імпульсних приводів для операцій вирубування, що і обумовлює необхідність розробки нового пресового устаткування з покращеними енергетичними, кінематичними та конструктивними параметрами.

1.6 Характеристика лінійного індукційно - динамічного двигуна

Для конструкції такого типу електродвигуна (рис.1.4) [МРМА25.00.00.000 ДО2] довжина зазору δ зв'язана з координатою x , що характеризує положення якоря наступним співвідношенням $\delta = l_1 - x$.

Виходячи з цього:

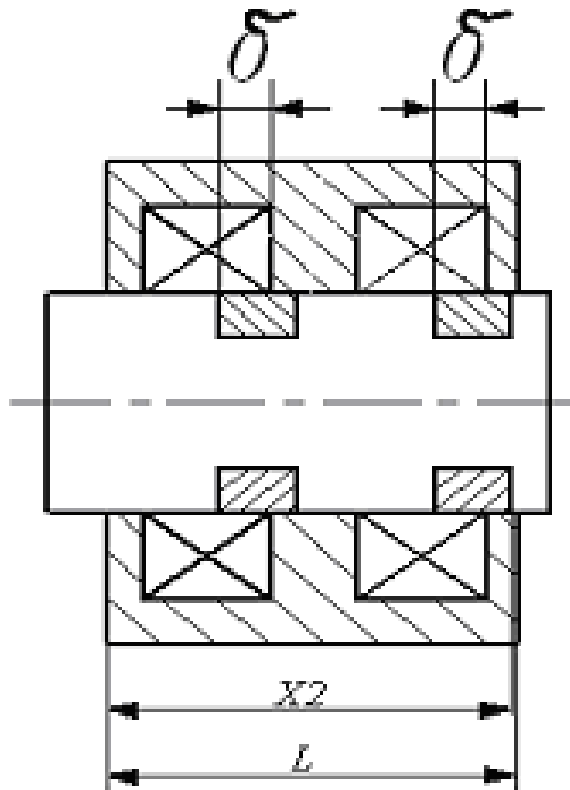
$$\frac{dL_{\kappa}}{dx} = \mu S w^2 \frac{1}{(l_1 - x)^2}. \quad (1.1)$$

А тягове зусилля буде рівнятися:

$$F_{ел} = \frac{1}{2} \frac{\mu S w^2}{(l_1 - x)^2} I^2. \quad (1.2)$$

З виразу (1.2) випливає, що при постійному струмі з ростом x зусилля буде збільшуватися. Вид тягових характеристик лінійного індукційно-динамічного двигуна приведений на рис.1.5.

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		



L , X_2 , δ - конструктивні параметри

Рисунок 1.4 - Лінійний індукційно-динамічний двигун:

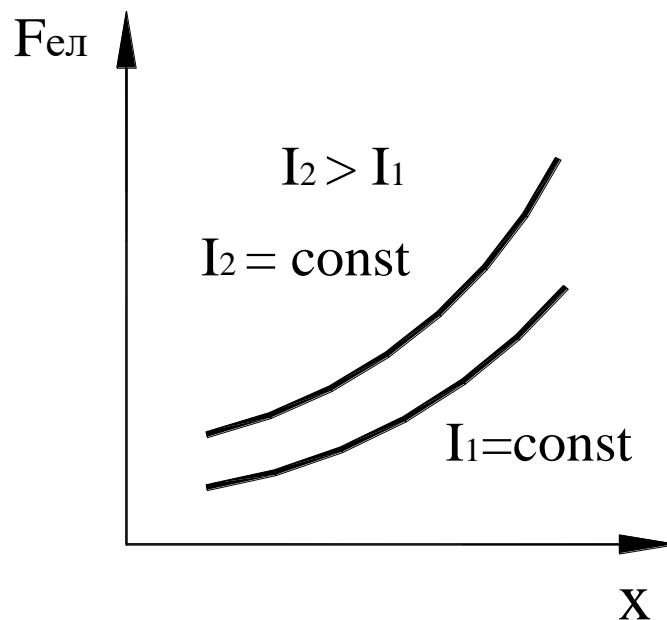


Рисунок 1.5 - Тягові характеристики лінійних індукційно-динамічних двигунів

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА25.00.00.000 ПЗ

Арк.

26

Якщо враховувати магнітний опір сталених частин магнітопроводу та паразитний зазор при розрахунку індуктивності обмотки то індуктивність цього типу електродвигуна буде знаходитися за формулою:

$$L_k = w^2 \frac{\mu S}{\delta_n + \frac{l_0}{\mu l} + 2\delta}, \quad (1.5)$$

де l_0 - повна довжина магнітної силової лінії;

δ_n - величина паразитного зазору;

μl - відносна проникливість матеріалу магнітопроводу.

Відповідно:

$$\frac{dL_k}{dx} = \mu S w^2 \frac{1}{\left(\delta_n + \frac{l_0}{\mu l} + 2(l_1 - x)\right)^2}. \quad (1.6)$$

А тягове зусилля буде визначатися:

$$F_{en} = \frac{1}{2} \frac{\mu S w^2}{\left(\delta_n + \frac{l_0}{\mu l} + 2(l_1 - x)\right)^2} I^2. \quad (1.7)$$

1.7 Висновки до першого розділу

У першому розділі було проведено комплексний огляд технологічних процесів галузевого машинобудування, технічних рішень та існуючих приводів, що застосовуються в обладнанні пресової та ударної дії із зворотно-поступальним рухом робочих органів. На основі аналізу визначено, що технологічні операції виру-

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

бування та перфорації деталей з полімерних і композиційних матеріалів пред'являють високі вимоги до динамічних параметрів приводів, їх енергоефективності, надійності та здатності формувати короткі, потужні імпульси зусилля.

Проаналізовані класифікації технологій та виробничих процесів показали, що операції ударного та пресового типу належать до одних із найбільш енергоємних та динамічно навантажених у машинобудуванні. Тому ефективність їх виконання значною мірою визначається вибором приводу, його динамічними властивостями, часом реакції, коефіцієнтом корисної дії та можливістю точного регулювання ходу робочого органу.

Порівняння традиційних приводів обладнання пресової дії - гідравлічних, пневматичних та електромеханічних - показало наявність суттєвих недоліків, таких як багатоступеневе перетворення енергії, низький коефіцієнт корисної дії, значні енергетичні втрати під час холостих ходів, складність конструкції, висока вартість експлуатації та обмеження щодо швидкодії. Спільним недоліком усіх цих приводів є неможливість повного вимкнення в проміжках між робочими циклами, що призводить до додаткових енерговитрат, які можуть становити до 70–90 % часу роботи обладнання.

Водночас аналіз лінійних електричних двигунів показав, що саме індукційно-динамічні двигуни (ЛПДД) мають найкращі граничні показники серед усіх типів лінійних приводів, зокрема високу питому потужність, значну питому силу тяги, високий коефіцієнт корисної дії та здатність до формування імпульсних переміщень з великим прискоренням. Їх принцип дії дозволяє здійснювати безпосереднє перетворення електричної енергії в механічну без проміжних ланок, що значно знижує втрати та підвищує енергоефективність приводу.

Патентний аналіз підтвердив, що більшість зарубіжних і вітчизняних розробок стосується лінійних електромагнітних двигунів, тоді як конструкцій з лінійними індукційно-динамічними двигунами набагато менше. Існуючі патентні рішення демонструють можливість створення ударних механізмів та пресових ма-

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

шин на основі ЛДД, однак такі конструкції здебільшого є одиничними або експериментальними і не охоплюють повністю вимоги, що висуваються сучасними виробничими процесами. Особливо відчутною є відсутність розробок двосекційних індукційно-динамічних двигунів, які здатні забезпечити більшу енерговіддачу та розширений діапазон робочих ходів.

Таким чином, результати аналізу першого розділу свідчать про наявність чітко вираженої науково-технічної проблеми: традиційні приводи пресового та ударного обладнання не забезпечують необхідної енергоефективності та динамічних характеристик, а існуючі зразки індукційно-динамічних двигунів не мають достатньої функціональної гнучкості для широкого промислового впровадження. Це обумовлює актуальність створення нового пресового обладнання з двосекційним лінійним індукційно-динамічним двигуном, який дозволить значно зменшити енерговитрати, підвищити продуктивність та якість виконання технологічних операцій вирубування і перфорації деталей у галузевому машинобудуванні.

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

2 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ПРЕСОВОГО ОБЛАДНАННЯ З ДВОХСЕКЦІЙНИМ ЛІНІЙНИМ ІНДУКЦІЙНО-ДИНАМІЧНИМ ДВИГУНОМ

2.1 Обґрунтування вибору конструктивної схеми пресового обладнання з двосекційним лінійним індукційно-динамічним двигуном

Розробка пресового обладнання для виконання технологічних операцій виробування та перфорації деталей з полімерних і композиційних матеріалів вимагає застосування приводу, здатного забезпечувати високі динамічні характеристики, точність переміщення робочого органу та стабільність імпульсного удару при мінімальних енергетичних витратах [17]. Традиційні приводи машин ударної та пресової дії, такі як електромеханічні, гідравлічні та пневматичні, мають низку обмежень, пов'язаних з багатоступеневими перетвореннями енергії, значною інерційністю елементів, підвищеним тепловиділенням, необхідністю мастила, високими експлуатаційними витратами та значним енергоспоживанням у режимах холостого ходу. Ці недоліки суттєво знижують ефективність роботи обладнання, особливо при виконанні операцій, що потребують коротких, але точних та енергоємних імпульсів.

З огляду на зазначені проблеми було здійснено аналіз можливості застосування лінійних електричних двигунів як приводів пресового обладнання. Лінійні двигуни, зокрема двигуни електромагнітного, електродинамічного, індукційного, магнітоелектричного та індукційно-динамічного типів, демонструють низку переваг, пов'язаних з відсутністю механічних передач, прямим перетворенням електричної енергії в поступальний рух та високою швидкодією. Проте серед усього розмаїття лінійних двигунів саме індукційно-динамічний двигун є найбільш перспективним для застосування в обладнанні ударної дії, що підтверджується літературними джерелами.

Індукційно-динамічні двигуни характеризуються високою питомою потужністю, великим прискоренням рухомих частин, можливістю створення значного

					MPMA25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

імпульсного зусилля та повною відсутністю проміжних механічних перетворювачів руху [17]. Водночас вони не споживають електричну енергію у режимах холостих ходів, що забезпечує суттєве енергозбереження порівняно з традиційними приводами. Для операцій вирубування, де до 90 % циклу займає холостий хід і підготовчі операції, така властивість є критично важливою. Таким чином, застосування ЛДД дозволяє значно зменшити експлуатаційні витрати, підвищити продуктивність та забезпечити точний контроль параметрів удару.

Одним із ключових завдань проєктування є визначення конструктивної схеми приводу. На основі аналізу технічних рішень встановлено, що найбільш ефективним є застосування двосекційного ЛДД. Двосекційна схема забезпечує формування складної імпульсної дії: перша секція створює попереднє прискорення якоря, тоді як друга забезпечує основний ударний імпульс. Такий принцип роботи дозволяє отримати збільшене імпульсне зусилля без значного підвищення маси або габаритів двигуна, покращити роботу в динамічних режимах та мінімізувати втрати енергії в магнітній системі. Подібні підходи описані в роботах із моделювання імпульсних електромагнітних систем [23; 24], що підтверджує доцільність вибору саме двосекційної конструкції.

Для виконання операцій вирубування та перфорації матеріалів важливим є також забезпечення точності удару та стабільності ходу ударника. Двосекційний ЛДД дозволяє розподілити магнітне навантаження між секціями, зменшити теплове навантаження на обмотки та магнітопровід, а також забезпечити плавнішу характеристику прискорення робочої частини приводу. Застосування двох незалежно керованих секцій дає можливість формувати ударний імпульс з урахуванням властивостей конкретного матеріалу, товщини заготовки та типу різака. Це робить обладнання універсальнішим та придатним для широкого спектра виробничих процесів.

Водночас конструктивна схема пресового обладнання з двосекційним ЛДД має бути адаптована до специфічних умов настільних машин. Це означає

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

необхідність забезпечення компактності системи, можливості точного регулювання висоти робочого органу, простоти обслуговування та високої надійності конструктивних вузлів. Схема приводу повинна включати елементи для регулювання положення ударника, системи для компенсації та гасіння коливань, а також пружинні системи для повернення рухомих частин у вихідне положення. Дослідження [25? 26] підтверджують, що використання циліндричних пружин є оптимальним способом повернення рухомих елементів у приводах ударної дії, особливо в обладнанні малої маси та обмеженого габариту.

Результати огляду патентів [18–22] демонструють відсутність серійних промислових рішень з використанням саме двосекційного індукційно-динамічного приводу в пресовому обладнанні. Це вказує на наукову новизну та технічну перспективність вибраного напрямку розроблення, а також на можливість отримання унікальних техніко-економічних переваг під час впровадження таких машин у виробництво.

Отже, обґрунтування вибору конструктивної схеми пресового обладнання з двосекційним ЛДД ґрунтується на високих динамічних можливостях приводу, його енергоефективності, здатності забезпечувати необхідні параметри ударного імпульсу, компактності конструкції та позитивних результатах аналізу сучасних технічних рішень і літературних джерел. Така схема є оптимальною для створення високопродуктивного, надійного та економічного пресового обладнання для операцій вирубкування та перфорації деталей із сучасних матеріалів.

2.2 Розробка структурної схеми пресового обладнання з двосекційним лінійним індукційно-динамічним двигуном

Структурна схема є ключовим елементом підготовчого етапу проєктування пресового обладнання з двосекційним лінійним індукційно-динамічним двигуном, оскільки вона відображає логічні та функціональні взаємозв'язки між

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

основними складовими вузлами та визначає принцип роботи всієї системи. На підставі аналізу технологічних вимог, особливостей імпульсних електромагнітних приводів та специфіки операцій вирубання й перфорації було розроблено структурну схему пресового обладнання, подану на рис. 2.1. Вона демонструє послідовність перетворення енергії та передачі силових впливів від джерела живлення до робочої зони.



Рисунок 2.1 – Структурна схема пресового обладнання

У загальному вигляді структурна схема описує рух енергії від блоку живлення до елементів виконавчого механізму. Блок живлення формує необхідні параметри імпульсу струму, які забезпечують роботу двосекційного лінійного індукційно-динамічного двигуна. У двосекційній конструкції імпульси можуть подаватися синхронно або з певною часовою затримкою, що дозволяє формувати керований профіль прискорення якоря. Це дає можливість забезпечувати різні режими удару залежно від типу матеріалу, товщини заготовки та вимог технологічної операції. Таким чином, структура системи передбачає використання керованого джерела живлення, здатного задавати параметри імпульсу окремо для кожної секції приводу.

У лінійному індукційно-динамічному двигуні електрична енергія імпульсу перетворюється на електродинамічну силу, що діє вздовж осі переміщення якоря. У схемі, поданій на рис. 2.1, це відображено у вигляді блоку ЛІДД, що є центральним елементом, який перетворює енергетичний сигнал у механічний імпульс. Між двигуном та ударником передбачена зворотна пружина, що виконує подвійну функцію: повертає ударник у вихідне положення після завершення робочого ходу та забезпечує демпфування механічних коливань, що виникають у кінці активної фази руху. Наявність пружинного елемента також дозволяє зменшити енергетичні втрати та стабілізувати роботу всієї виконавчої частини приводу, особливо в умовах повторно-короткочасних режимів.

Ударник, відповідно до структурної схеми, виконує функцію передавання імпульсної сили від ЛІДД до різака. Його конструктивне виконання забезпечує мінімальні втрати енергії та високу точність спрямування руху. В структурній схемі ударник показано як окрему функціональну ланку, що отримує механічний імпульс і передає його на ріжучий інструмент. Різак взаємодіє з матеріалом, який розміщений на плиті, утворюючи завершальну ланку перетворення енергії в механічну роботу. Плита слугує опорною поверхнею, що забезпечує необхідну жорсткість та стабільність технологічного процесу.

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

Структурна схема (рис. 2.1) також демонструє відсутність проміжних механічних передач, які традиційно застосовуються в гідравлічних або електромеханічних приводах. Завдяки прямому перетворенню електричної енергії у лінійне переміщення робочого органу зменшується кількість елементів, що підлягають зносу, покращується динамічна характеристика руху, а також мінімізуються втрати енергії. Це особливо важливо в режимах одиничних імпульсних навантажень, характерних для операцій вирубкування та перфорації.

Таким чином, розроблена структурна схема забезпечує повне та логічно узгоджене відображення процесу перетворення енергії в пресовому обладнанні з двосекційним ЛДД. Вона є основою для подальшої розробки кінематичної, електричної та компоновочної схем, а також дозволяє чітко визначити функціональні ролі кожного конструктивного елемента.

2.3 Вихідні дані лінійного індукційно-динамічного двигуна

Вихідні дані є основою для подальшого етапу проектування, оскільки саме вони визначають конструктивні параметри, електромагнітні характеристики та режим роботи двосекційного лінійного індукційно-динамічного двигуна, який використовується як виконавчий привід у пресовому обладнанні. На підставі аналізу технологічних вимог до операцій вирубкування та перфорації, а також досліджень, виконаних у роботах з електромагнітних ударних систем [25, 26], було сформовано перелік вихідних параметрів, що визначають базову конструкцію ЛДД та його подальшу оптимізацію.

Тип лінійного індукційно-динамічного двигуна обрано втяжним, що обумовлено необхідністю створення спрямованої осьової сили на робочому органі та забезпеченням високої швидкодії у момент імпульсного розряду. Застосування втяжної схеми дозволяє зменшити масу рухомих елементів, оптимізувати конфігурацію магнітного поля та забезпечити стабільне прискорення якоря. Рід струму в обмотках визначено як постійний, оскільки живлення двигуна здійснюється від

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

імпульсного блока, де струм формується в результаті розряду накопичувального елемента. Це забезпечує генерацію короткочасних імпульсів високої амплітуди, необхідних для ударних технологічних операцій.

Спосіб здійснення робочого ходу визначено використанням двох окремих обмоток, що працюють послідовно або синхронно, формуючи двосекційний керований імпульс. Поділ приводу на дві секції дозволяє впливати на профіль прискорення якоря, збільшувати імпульсну силу та забезпечувати більш ефективний розподіл енергії між магнітними контурами. Такий підхід відповідає рекомендаціям, викладеним у сучасних дослідженнях лінійних індукційних приводів [1], де підкреслюється перевага багатосекційних структур для отримання високої питомої потужності.

Холостий хід двигуна здійснюється за рахунок енергії зворотної пружини, що повертає якорь у початкове положення після завершення робочого циклу. Вибір пружинного елемента обґрунтовано властивостями ударних механізмів малої та середньої потужності, у яких зусилля повернення є незначним порівняно з робочим імпульсом. За даними [17], використання зворотної пружини дозволяє зменшити інерційні втрати, підвищити швидкість циклу та забезпечити стійкість роботи при повторно-короткочасних навантаженнях.

Регулювання основних параметрів ЛДД, таких як амплітуда електромагнітної сили, величина ходу якоря та швидкість ударника, здійснюється зміною характеристик джерела живлення, зокрема напруги заряду, ємності накопичувального елемента та форми імпульсу струму. Регулювання через блок живлення дозволяє уникнути складних механічних вузлів, зберігаючи простоту конструкції та підвищуючи надійність пристрою.

Вихідні параметри пресового обладнання узгоджуються з технологічними вимогами до операцій вирубання. Робочий хід ударника має становити до 30 мм, що є достатнім для формування отворів та вирубання деталей зі шкіри, полімерних та композиційних матеріалів. Частота ударів визначена на рівні до 30 хв⁻¹, тобто установка працює в одиничному режимі з можливістю безперервного

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

повторення циклів із інтервалом, достатнім для охолодження та стабілізації приводу. Конструктивне виконання обрано настільним, із вертикальним розміщенням робочого органу, що забезпечує компактність, зручність обслуговування та адаптацію до невеликих виробничих площ.

На основі вихідних та розрахункових даних було визначено ключові параметри, якими повинен характеризуватися лінійний індукційно-динамічний двигун. Максимальна електромагнітна сила ЛІДД становить $F_{i_{нд}} = 100000 \text{ Н}$, що дає змогу забезпечити ударну дію достатньої інтенсивності для вирубування матеріалів різної жорсткості. Хід якоря дорівнює $\delta_{як} = 25 \text{ мм}$, що відповідає геометрії виконавчого механізму. Діаметр якоря встановлено на рівні $d_{як} = 70 \text{ мм}$, а висота двигуна $L_{дв} = 175 \text{ мм}$, що забезпечує необхідну компактність та ефективний розподіл магнітного потоку. Обмотка двигуна має містити $w = 347$ витків мідного проводу діаметром $d_{пр} = 2,5 \text{ мм}$, а її активний електричний опір становить $R = 0,2 \text{ Ом}$. Такі параметри узгоджені з тепловими обмеженнями і дозволяють забезпечити короткочасний пропуск імпульсів високої амплітуди.

Матеріали магнітопроводу (статора, якоря та фланців) обрані згідно з рекомендаціями сучасних праць з електромагнітних приводів [24; 28] та виготовляються зі сталі марки Сталь 10. Циліндричний статор передбачено нешихтованим з радіальними пазами для зменшення вихрових струмів, що підвищує енергоефективність та знижує нагрів. Направляючі стержні виготовляються з немагнітної нержавіючої сталі 1Х18Н9Т, що забезпечує стабільність руху та усуває паразитні магнітні сили. Каркас обмотки виконують із теплостійкої пластмаси, а обмотку - з мідного емальованого дроту марки ПЕВ-2,5, що гарантує високу міцність, електричну стійкість та термостабільність обмоточного вузла.

Таким чином, сформований набір вихідних параметрів дозволяє перейти до наступного етапу проєктування конструкції пресового обладнання та виконання розрахунків його силових, електромагнітних і кінематичних характеристик.

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

2.4 Розробка конструкції пресового обладнання з двосекційним лінійним індукційно-динамічним двигуном

Розробка конструкції пресового обладнання з двосекційним лінійним індукційно-динамічним двигуном (ЛІДД) є ключовим етапом створення високоефективної машини ударної дії, призначеної для виконання операцій вирубування та перфорації деталей з полімерних та композиційних матеріалів у галузевому машинобудуванні. У порівнянні з традиційними приводами, конструкція обладнання з імпульсним електромагнітним приводом дає змогу суттєво підвищити продуктивність, точність і стабільність технологічного процесу, а також зменшити енерговитрати завдяки дискретному перетворенню енергії та роботі приводу виключно в момент виконання технологічної операції.

На рис. 2.2 та на кресленні [МРМА25.00.00.000 СК], представлена конструктивна схема пресу з двосекційним ЛІДД.

Конструкція обладнання включає комплекс механічних, електромагнітних і напрямних елементів, які формують жорстку, надійну і технологічно збалансовану систему. Привід закріплений на станині 15, яка є базовою опорною структурою пресового обладнання. Станина забезпечує просторову жорсткість конструкції, сприймає навантаження від ударних імпульсів, рівномірно передає їх на фундамент або робочу поверхню та забезпечує точність взаємного розташування всіх вузлів.

Основою виконавчого механізму є двосекційний лінійний індукційно-динамічний двигун, структура якого включає циліндричний статор 1, всередині якого розташовані котушки з обмотками 5, що формують імпульсне електромагнітне поле. Дві секції індуктора дозволяють послідовно формувати початковий та основний імпульси, що забезпечує підвищену імпульсну енергію приводу. Таке конструктивне рішення дає можливість збільшити силу удару, розширити діапазон перероблюваних матеріалів та підвищити стабільність роботи обладнання.

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

Циліндрична форма статора забезпечує рівномірний розподіл магнітного поля та мінімізацію втрат на розсіювання.

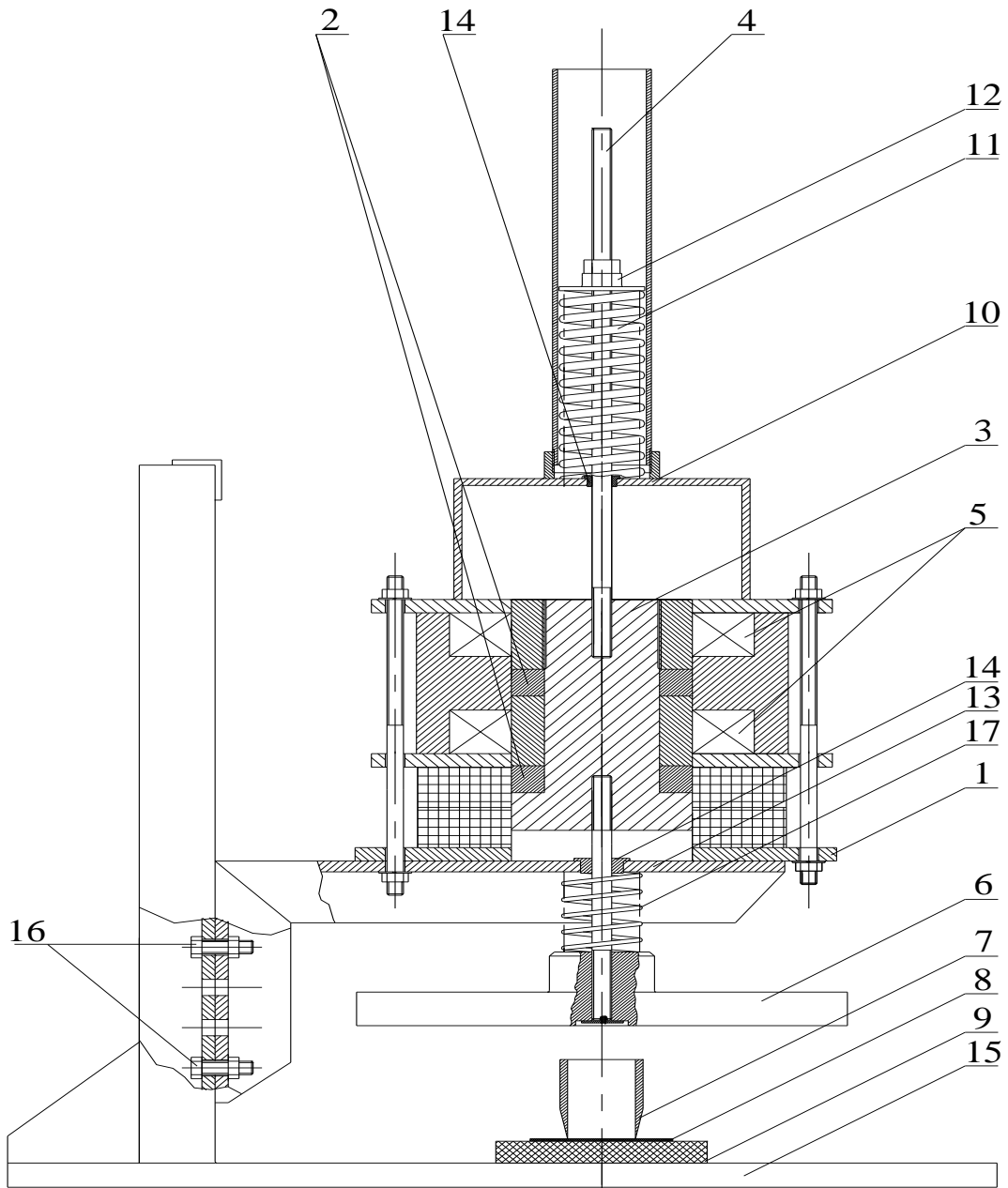


Рисунок 2.2 - Конструктивна схема пресового обладнання з ЛІДД

Рухома частина приводу представлена якорем 3, конструкція якого включає два мідні кільця 2, що виконують функцію короткозамкнених елементів, у

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

MPMA25.00.00.000 ПЗ

Арк.
39

яких при протіканні імпульсного струму індукуються вихрові струми, що створюють електродинамічну силу, спрямовану проти потоку в обмотках індуктора. Ці сили формують прямолінійне прискорення якоря, що є основою ударної дії приводу. Мідні кільця виконані з високопровідного матеріалу, що зменшує активний опір та збільшує величину взаємодії із змінним магнітним полем. Конструкція якоря забезпечує високу механічну міцність, витримує циклічні ударні навантаження та дозволяє працювати при підвищених частотах циклів.

До якоря безпосередньо прикріплений ударник 6, який передає імпульсну силу на різальний інструмент. Ударник, виконаний зі сталі або високоміцного сплаву, має необхідну жорсткість і зносостійкість, що запобігає його деформаціям та втраті точності при тривалій роботі. Конструкція ударника дає можливість здійснювати його регулювання шляхом вкручування або викручування в тіло якоря, що дозволяє точно встановлювати положення робочої кромки відносно поверхні матеріалу 8. Це особливо важливо при зміні товщини заготовки, оскільки дає змогу уникнути недостатнього або надмірного удару під час вирубування.

Над якорем розташований стержень 4, який вкручується у верхню частину рухомого вузла. Стержень обмежує хід якоря, забезпечує можливість регулювання початкового положення рухомої системи та бере участь у формуванні кінематичної структури приводу. Тиск і початковий натяг пружинної системи регулюється за допомогою гайки 12, що дозволяє адаптувати характеристики приводу під конкретний технологічний режим.

Пружина 11, розташована на стакані 10, виконує важливу функцію повернення ударника та якоря у вихідне положення після завершення робочого імпульсу. Конструкція дозволяє встановлювати пружини різної жорсткості, що розширює можливості налаштування обладнання для роботи з матеріалами різної щільності, пружності та товщини. На нижній частині двигуна розміщена нижня кришка 1, яка утримує пружину від зміщення та фіксує нижню опорну точку рухомої частини системи.

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

Особливу роль у конструкції ЛДД відіграють дві мідні напрямні втулки 14. Вони забезпечують точність прямолінійного руху якоря, мінімізують радіальні люфти та знижують вібрацію рухомої частини під час прискорення. Мідний матеріал втулок зумовлений низьким коефіцієнтом тертя та стійкістю до високочастотних механічних коливань. Він забезпечує плавність руху та зменшує ризик заклинювання, що є критичним для роботи обладнання на високих частотах циклів.

Додатковою конструктивною особливістю є компенсаційна пружина 17. Вона призначена для поглинання коливань та резонансних хвиль, які виникають після ударного імпульсу. Наявність компенсаційної пружини знижує динамічні навантаження на напрямні, запобігає передчасному зношуванню вузлів та сприяє підвищенню стабільності технологічного процесу. Крім того, ця пружина покращує повторюваність ударів, що є необхідною умовою для якісного вирубання деталей із складних композиційних матеріалів.

Положення двигуна по висоті регулюється за допомогою переміщення основи 13, яка кріпиться до станини 15 за допомогою болтів та гайок 16. Це дає змогу точно встановити відстань між ударником і вирубною плитою 9 залежно від характеристик заготовки та висоти різака 7. Регулювання положення двигуна є важливою функцією, оскільки дозволяє адаптувати обладнання для роботи з широким спектром матеріалів, що мають різні розміри, жорсткість та структуру.

Важливим елементом оснащення пресового обладнання є вирубочна плита 9, на якій розміщений матеріал 8. Вона забезпечує жорстку опору для різака 7 під час виконання технологічної операції. Конструкція плити передбачає її швидку заміну, що підвищує зручність експлуатації та дає змогу адаптувати обладнання під різні типи різака або геометрію деталей.

Уся конструкція пресу орієнтована на забезпечення високої точності і повторюваності робочих циклів. Важливою перевагою ЛДД є те, що енергія споживається тільки під час імпульсу вирубання, тоді як у традиційних приводах зна-

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

чні втрати виникають під час холостих ходів. Це дозволяє зменшити енергоспоживання обладнання від 30 до 60 %, що є важливим фактором при експлуатації в умовах безперервного виробництва.

У процесі розробки конструкції були враховані ергономічні вимоги, можливість виконання сервісного обслуговування, легкість заміни пружин, ударника та різака. Обладнання має модульну структуру, що дозволяє проводити ремонт окремих вузлів без необхідності повного демонтажу приводу.

Таким чином, створена конструкція пресового обладнання з двосекційним лінійним індукційно-динамічним двигуном є комплексною інженерною системою, яка поєднує високу енергетичну ефективність, точність виконання операцій, надійність та гнучкість у налаштуванні. Використання двосекційного ЛІДД забезпечує необхідну імпульсну енергію, розширює можливості обладнання та робить його адаптованим до сучасних вимог галузевого машинобудування.

2.5 Принцип роботи пресового обладнання з ЛІДД

Пресове обладнання з двосекційним лінійним індукційно-динамічним двигуном працює в імпульсному режимі, при якому основне зусилля формується за рахунок електродинамічної взаємодії між магнітним полем індуктора та вихровими струмами, що індукуються у мідних кільцях якоря. Робочий цикл преса складається з кількох послідовних етапів, кожен з яких характеризується перетворенням електричної енергії в механічну роботу ударного характеру. На початковому етапі матеріал, з якого виготовляється деталь, розміщується на вирубочній плиті. Виріб або заготовка (поз. 8) укладається на поверхню плити 9 з урахуванням орієнтації різака, після чого на матеріал встановлюється різак 7, який має конфігурацію майбутньої вирубаної деталі (рис.2.2).

Після підготовки робочої зони відбувається подача електричного імпульсу в обмотки збудження 5 лінійного індукційно-динамічного двигуна. Імпульс формується блоком живлення та характеризується певною амплітудою, тривалістю та

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

швидкістю наростання струму. В момент проходження імпульсу в обмотках створюється імпульсне магнітне поле, яке пронизує магнітопровід статора та кільцеві елементи якоря 3. Внаслідок дії змінного магнітного потоку у мідних кільцях якоря індукуються вихрові струми, напрямлені назустріч струму в обмотках. Взаємодія цих зустрічних струмів створює електродинамічну відштовхувальну силу, яка спрямована вздовж осі двигуна та викликає інтенсивне прискорення якоря.

Далі якір 3, прикріплений до ударника 6 через направляючий стержень, починає переміщуватися вниз. У процесі руху відбувається стискання зворотної пружини 11, яка є елементом повернення та одночасно виконує роль демпфера, що поглинає частину енергії після завершення робочого ходу. Ударник, що жорстко з'єднаний з якорем, передає створену електродинамічну силу на різак 7. Момент контакту ударника з різакіом відповідає максимальній фазі передачі імпульсу, що спричиняє вирубування деталі з матеріалу 8. Різак входить у матеріал з великою швидкістю, забезпечуючи чітку геометрію зрізу та мінімальну деформацію країв.

Після завершення ударної фази імпульс струму в обмотках припиняється, магнітне поле різко зменшується, і взаємодія електродинамічних сил зникає. У цей момент відбувається зворотний рух рухомих елементів системи. Енергія, накопичена у пружині 11 під час стискання, забезпечує повернення ударника та якоря у вихідне положення. Дія пружини компенсує залишкові коливання та знижує інерційні удари в кінці ходу, що позитивно впливає на довговічність конструкції та стабільність роботи двигуна. Після повного повернення рухомих частин у початкове положення прес готовий до повторення циклу.

Таким чином, принцип роботи пресового обладнання з ЛІДД ґрунтується на імпульсному перетворенні електричної енергії у механічну силу прямолінійного переміщення. Висока швидкодія електромагнітного приводу, відсутність проміжних кінематичних елементів і можливість точного керування параметрами імпульсу забезпечують переваги цього типу обладнання над традиційними гідравлічними та електромеханічними приводами. Завдяки цьому прес з лінійним індукційно-динамічним двигуном є енергоефективним, технологічно універсальним

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

та придатним для широкого спектра операцій вирубубвання і перфорації матеріалів різної жорсткості.

2.6 Розробка пристрою живлення та управління ЛДД

Ефективність роботи пресового обладнання з двосекційним лінійним індукційно-динамічним двигуном значною мірою визначається параметрами системи живлення та управління, яка формує імпульси електричної енергії необхідної амплітуди, тривалості та форми. Оскільки ЛДД працює в режимі дискретного енергоперетворення і потребує короткочасних імпульсів великої потужності, було прийнято рішення використовувати джерело живлення у вигляді ємнісного накопичувача енергії (рис.2.3, лист [МРМА25.00.00.000 Е3]).

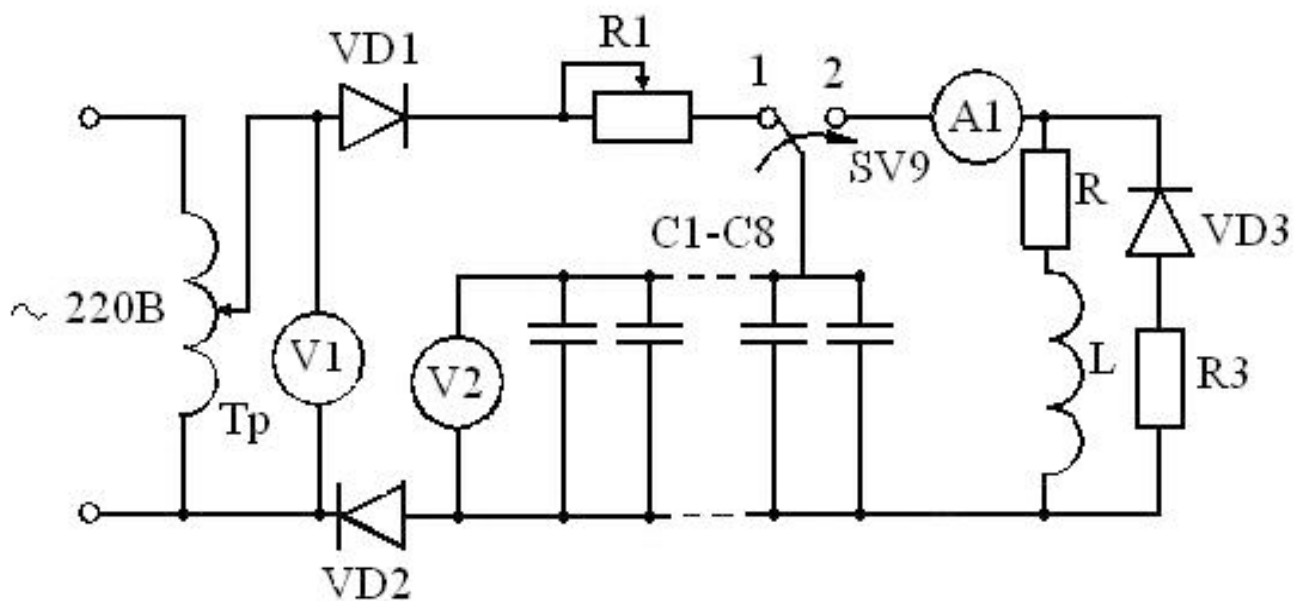


Рисунок 2.3 - Пристрій живлення та управління у вигляді ємнісного накопичувача

Така схема забезпечує подачу на індуктор імпульсу напруги та струму значної величини, що створює в котушках обмотки 5 потужне імпульсне магнітне

поле, яке взаємодіє з короткозамкненими мідними кільцями 2 якоря 3 та приводить його в рух.

Пристрій живлення виконаний як окремий модуль, відокремлений від механічної частини пресового обладнання, що дозволяє зменшити вплив електромагнітних полів на конструкційні елементи преса, забезпечити просте технічне обслуговування, підвищити надійність та модульність системи. Блок живлення забезпечує можливість регулювання амплітуди імпульсу напруги, який прикладається до котушки індуктивності ЛІДД, що дозволяє змінювати значення розрядного струму та електромагнітної сили, а також регулювати тривалість імпульсу, яка впливає на переміщення ударника 6 і формування енергії удару. Крім того, пристрій живлення забезпечує примусове гасіння магнітного поля після завершення імпульсу, що запобігає залишковим коливанням рухомих елементів.

Регулювання основних параметрів імпульсу здійснюється за кількома каналами. Амплітуда імпульсу визначається напругою зарядки ємнісного накопичувача, яка встановлюється за допомогою автотрансформатора, що підключений до мережі змінного струму 220 В. У початковому положенні перемикача 1 здійснюється зарядка конденсаторної батареї до напруги U_z , причому величина U_z регулюється плавно, що дозволяє контролювати силу удару та адаптувати обладнання до різних матеріалів. Тривалість імпульсу залежить від сумарної ємності батареї конденсаторів, внутрішнього опору кола розряду та параметрів індуктора. Таким чином, зміна ємності дозволяє корегувати характер енергоперетворення в ЛІДД без втручання в конструкцію самого двигуна.

Після переведення перемикача в положення 2 конденсатори підключаються до котушки індуктивності ЛІДД. У цей момент через силовий комутатор (тиристор або транзисторний ключ) відбувається миттєва подача імпульсу струму в обмотку 5. Енергія, запасена в конденсаторах, за частки мілісекунди переходить у магнітну енергію індуктора. У результаті в поверхневому шарі мідних кілець 2 якоря 3 індуються вихрові струми, які створюють електродинамічну та електромагнітну складові відштовхувальних сил. Ці сили спрямовані проти магнітного

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

поля обмотки 5 і створюють прискорений рух якоря вниз відносно статора. Разом із якорем переміщується ударник 6, тоді як пружина 11, розташована на стакані 10, частково стискається і накопичує енергію для наступного повернення якоря в початкове положення. У цей момент сила тиску ударника на різак 7 досягає максимального значення, що забезпечує вирубування або перфорацію матеріалу 8 на плиті 9.

Після зменшення напруги на індукторі необхідно забезпечити швидке гасіння магнітного поля, щоб запобігти залишковим коливанням рухомих елементів та перегріву обмоток. Для цього у схемі використано демпферний резистивно-індуктивний контур, який поглинає залишкову енергію магнітного поля. Додатково передбачені елементи електричного захисту, включаючи варистори, діоди вільного ходу та резистори обмеження перенапруг. Після завершення імпульсу конденсаторна батарея автоматично переходить у режим повторної зарядки, а пружина 11 повертає якір 3 і ударник 6 у вихідне положення. Таким чином, забезпечується циклічність процесу та можливість роботи обладнання в одиничному або серійно-повторюваному режимі при частоті ударів до 30 хв^{-1} .

Особливу увагу під час розробки пристрою живлення приділено вибору елементної бази. Конденсатори мають бути імпульсного типу, із малою величиною еквівалентного серійного опору (ESR) та високою стійкістю до багаторазових циклів заряд-розряд. Силовий ключ повинен забезпечувати комутацію струмів великої величини та витримувати імпульсні навантаження без деградації параметрів. Значущим є й вибір елементів гасіння перенапруг, оскільки ЛДД генерує потужні зворотні електромагнітні імпульси. Для запобігання електромагнітним завадам передбачено екранування високострумів провідників, фільтрацію високочастотних складових напруги та правильне заземлення корпусу.

Проаналізувавши дані роботи [17], можна стверджувати, що енергетичні параметри та експлуатаційна ефективність лінійних електричних двигунів імпульсної дії визначаються не лише їх конструкцією, а в першу чергу - характеристи-

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

ками пристроїв живлення та керування. Саме від елементної бази джерела живлення залежить коефіцієнт корисної дії, ступінь нагрівання обмоток, стабільність удару та загальна надійність пресового обладнання з ЛІДД. З огляду на це розроблений пристрій живлення у вигляді керованого ємнісного накопичувача відповідає сучасним вимогам до імпульсних електромагнітних систем і забезпечує повноцінну роботу преса в умовах галузевого машинобудування.

2.7 Загальний вигляд пресового обладнання з лінійним індукційно-динамічним двигуном

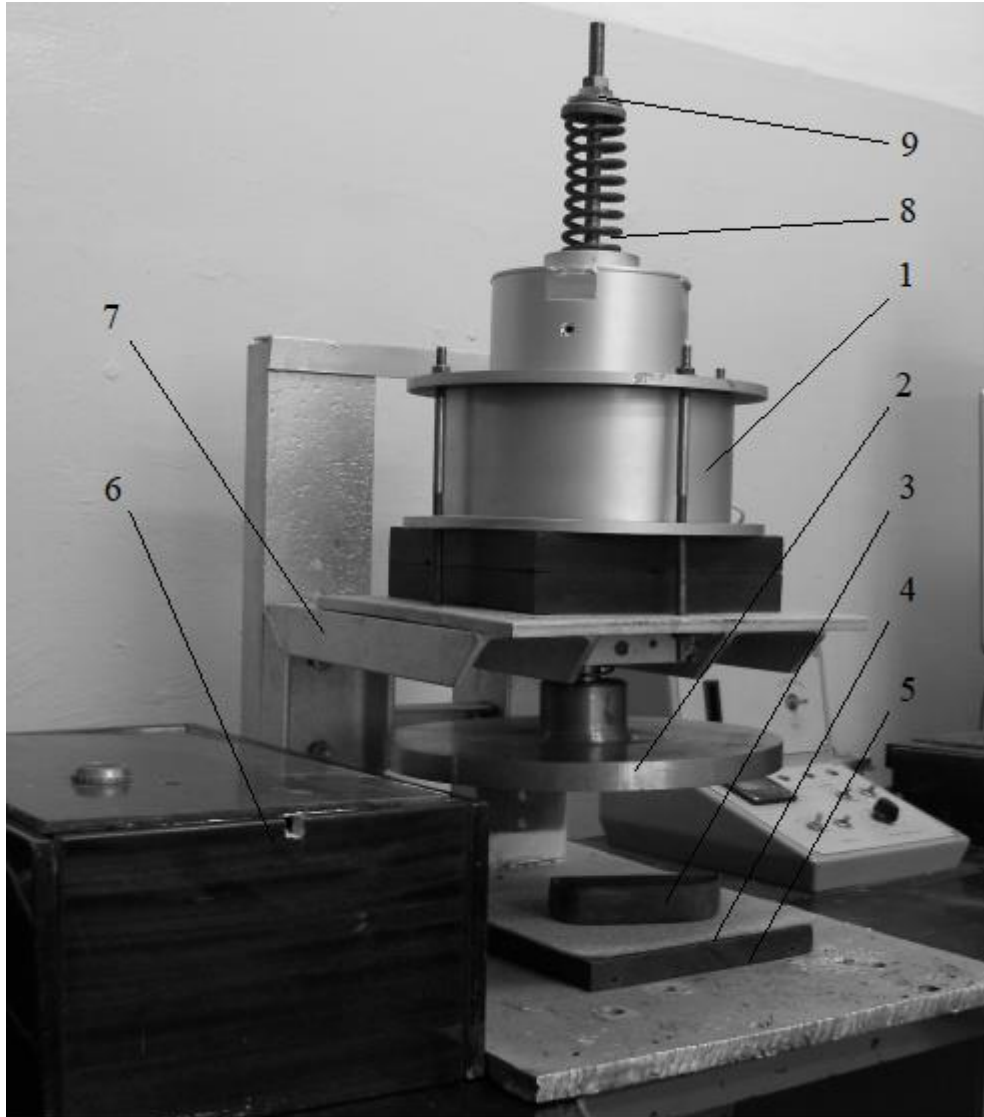
Загальний вигляд пресового обладнання, призначеного для виконання операцій вирубування та перфорації деталей з полімерних, композиційних і шкіряних матеріалів, наведено на рис. 2.5. Конструкція обладнання реалізує принцип імпульсної дії на різальний інструмент, що забезпечується двосекційним лінійним індукційно-динамічним двигуном (ЛІДД), який є основним силовим елементом преса. На рисунку представлені всі основні вузли пресового обладнання, що забезпечують виконання технологічного циклу.

У верхній частині конструкції розміщений лінійний індукційно-динамічний двигун (1), який складається зі статора, обмоток збудження та рухомого якоря. На вихідному штоку двигуна закріплена зворотна пружина (8), що забезпечує повернення рухомих елементів у початкове положення після завершення імпульсу. Верхня гайка (9) виконує функцію регулювання попереднього натягу пружини, а також визначає початкову позицію ударника відносно робочої зони.

Безпосередньо під двигуном розташований ударник (2), який передає імпульсну силу від якоря ЛІДД до різака. Ударник встановлений на напрямних та рухається строго вертикально для забезпечення точності вирубування. В зоні контакту ударника з матеріалом встановлюється різак (3) відповідної форми, який

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

визначає контур вирубаної деталі. Матеріал (4), з якого здійснюється вирубання, розташовується на жорсткій опорній плиті (5), що забезпечує необхідну стабільність та рівномірність розподілу зусилля під час удару.



1 - лінійний індукційно-динамічний двигун; 2 – ударник; 3 – різак;
4 – матеріал; 5 – плита; 6 – блок живлення; 7 – консоль;
8 – зворотна пружина; 9 – гайка

Рисунок 2.5 - Загальний вигляд пресового обладнання з ЛІДД:

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА25.00.00.000 ПЗ

Арк.
48

ЛІДД кріпиться до масивної металевої консолі (7), яка забезпечує рівномірний розподіл навантаження та запобігає вібраціям у момент дії імпульсу. Консоль закріплена на станині, що забезпечує загальну жорсткість конструкції та стійкість під час роботи.

Імпульсне живлення двигуна подається від окремого блоку живлення (6), розташованого з лівої сторони конструкції. Блок живлення містить ємнісний накопичувач енергії, систему керування зарядом, силовий комутуючий елемент та елементи захисту. Він забезпечує подачу імпульсу струму необхідної величини та тривалості в обмотки ЛІДД, що формує ударну силу, достатню для вирубування матеріалу. Розміщення блоку живлення окремо від силової частини зменшує нагрів обладнання, підвищує його надійність і спрощує технічне обслуговування.

Уся конструкція пресового обладнання є компактною, жорсткою та орієнтованою на виконання одиничних або серійних технологічних операцій вирубування. Застосування ЛІДД дозволяє суттєво скоротити енергоспоживання обладнання завдяки дискретному режиму роботи та відсутності постійних енергетичних втрат, властивих гідравлічним або електромеханічним приводам. Важливою перевагою є також мінімальна кількість рухомих частин, що зменшує знос та підвищує експлуатаційний ресурс преса.

Таким чином, загальний вигляд пресового обладнання свідчить про комплексне поєднання електромагнітного імпульсного приводу та точної механічної системи, що разом забезпечують високу продуктивність, надійність і якість вирубувальних операцій.

2.8 Висновки до другого розділу

У другому розділі було здійснено повний комплекс досліджень, спрямованих на розробку конструкції пресового обладнання з двосекційним лінійним індукційно-динамічним двигуном (ЛІДД), визначення його параметрів, формування

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

структурної схеми та обґрунтування принципів роботи системи живлення та керування. На підставі аналізу технологічних вимог до операцій вирубування і перфорації деталей у галузевому машинобудуванні обґрунтовано доцільність застосування імпульсного електромагнітного приводу як основи силової системи пресового обладнання. Вибір двосекційної схеми індуктора дозволив забезпечити підвищену швидкодію, покращені динамічні характеристики та можливість адаптації параметрів удару до різних типів матеріалів.

У розділі сформульовано вихідні дані лінійного індукційно-динамічного двигуна, якими визначено його основні електромагнітні, конструктивні та геометричні параметри. Обґрунтовано вибір матеріалів магнітопроводу, провідників обмоток, напрямних і пружинних елементів з урахуванням умов роботи приводу в імпульсному режимі. Розглянуто вплив робочого та холостого ходу на ефективність ЛДД, що дозволило вибрати пружину як оптимальний елемент повернення рухомої системи у вихідне положення.

Важливою складовою другого розділу стала розробка структурної схеми пресового обладнання, яка відображає всі ключові елементи від джерела живлення до робочої зони та визначає їх функціональні взаємозв'язки. На основі структурної схеми виконано детальний аналіз конструкції пресового обладнання та сформовано кінематичну логіку його роботи. Запропоновано конструктивну схему, яка забезпечує компактність, жорсткість, надійність та технологічну простоту.

Особливу увагу приділено розробці пристрою живлення та управління ЛДД. Використання ємнісного накопичувача енергії дозволило забезпечити формування керованих імпульсів струму великої амплітуди та короткої тривалості, що є необхідними для ефективної роботи індукційно-динамічного приводу. Описано процес заряджання, розряджання, формування магнітного імпульсу та гасіння залишкового поля. Показано, що параметри імпульсу визначають не лише силу удару, але і тепловий режим, надійність і довговічність ЛДД.

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

У завершальній частині розділу наведено загальний вигляд пресового обладнання, що дозволило візуалізувати конструктивне виконання та взаємне розташування всіх основних вузлів. Представлений макет демонструє компактність системи, зручність доступу до вузлів та відповідність обладнання вимогам експлуатації у виробничих умовах.

Загалом, результати другого розділу підтверджують можливість та доцільність створення пресового обладнання на основі двосекційного ЛДД. Запропонована конструкція має високий потенціал для застосування в галузевому машинобудуванні, забезпечує енергоефективність, високу надійність і стабільність роботи в умовах імпульсних навантажень, а також відкриває можливість подальшої оптимізації та модернізації.

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

3 РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ПРЕСОВОГО ОБЛАДНАННЯ З ЛІДД

3.1 Електромагнітний розрахунок ЛІДД

У розрахунку використано вихідні дані [27, 28]:

- $F_{інд}=100000$ Н,
- $\delta_{як}=25$ мм= $0,025$ м,
- $d_{як}=70$ мм,
- $w=347$,
- $R=0,2$ Ом,
- провід $d_{пр}=2,5$ мм.

Приймаємо середню силу:

$$F_{ср}=0,4 \cdot F_{інд}=0,4 \cdot 100000=40000 \text{ Н.} \quad (3.1)$$

1. Механічна робота імпульсу:

$$A_{мех}=F_{ср} \cdot \delta_{як}, \quad (3.2)$$

$$A_{мех}=40000 \cdot 0,025=1000 \text{ Дж.}$$

2. Енергія магнітного поля ЛІДД

Враховуючи ККД магнітного перетворення $\eta_m \approx 0,8$:

$$W_{маг}=A_{мех} / \eta_m, \quad (3.3)$$

$$W_{маг}=1000/0,8=1250 \text{ Дж.}$$

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

3. Розрахунок індуктивності обмотки

Геометрія осердя:

$$r_{\text{як}} = d_{\text{як}}/2 = 0,035 \text{ м}, \quad (3.4)$$

$$S = \pi r_{\text{як}}^2 = \pi(0,035)^2 \approx 0,00385 \text{ м}^2. \quad (3.5)$$

Індуктивність соленоїда з урахуванням магнітопроводу:

$$L = \mu_0 \mu_{\text{еф}} w^2 S / l_{\text{маг}}. \quad (3.6)$$

Підставляємо:

- $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м},$

- $\mu_{\text{еф}} \approx 1500,$

- $w^2 = 3472 = 120409,$

- $l_{\text{маг}} \approx 0,15 \text{ м}.$

і отримаємо:

$$L = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1500 \cdot 120409 \cdot 0,00385 / 0,15 = 5,8 \text{ Гн}. \quad (3.7)$$

4. Розрядний струм котушки

Енергія магнітного поля пов'язана зі струмом:

$$W_{\text{маг}} = 1/2(LI^2). \quad (3.8)$$

Звідси:

$$I = \sqrt{2W_{\text{маг}}/L}. \quad (3.9)$$

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

Підставляємо:

$$I = \sqrt{2 \cdot \frac{1250}{5,8}} = 20,7 \text{ А.}$$

5. Перевірка густини струму в проводі

Площа перерізу проводу:

$$r_{\text{пр}} = 2,5/2 = 1,25 \text{ мм,}$$

$$S_{\text{пр}} = \pi r_{\text{пр}}^2 = \pi (1,25)^2 = 4,9 \text{ мм}^2. \quad (3.10)$$

Густина струму:

$$J = I / S_{\text{пр}}. \quad (3.11)$$

$$J = 20,7/4,9 \approx 4,2 \text{ А/мм}^2.$$

Це допустиме значення для імпульсного режиму.

6. Миттєві теплові втрати в обмотці

$$P_{\text{мід}} = I^2 R, \quad (3.12)$$

$$P_{\text{мід}} = (20,7)^2 \cdot 0,2 = 85,6 \text{ Вт.}$$

Енергія, що втрачається за імпульс ($\tau = 0,02 \text{ с}$):

$$W_{\text{мід}} = P_{\text{мід}} \cdot \tau, \quad (3.13)$$

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

$$W_{\text{мід}}=85,6 \cdot 0,02 \approx 1,7 \text{ Дж.}$$

Вона становить менше 0,2 % від енергії магнітного поля, що цілком прийнятно.

3.2 Розрахунок ємнісного накопичувача енергії джерела живлення ЛІДД

Зробимо ще один базовий, але важливий розрахунок - розрахунок ємнісного накопичувача енергії джерела живлення ЛІДД на основі вже прийнятої енергії імпульсу [29].

Нехай, як у попередньому електромагнітному розрахунку, потрібна енергія, що накопичується в системі, становить $W_{\text{маг}}=1250$ Дж.

У ємнісному накопичувачі енергія визначається співвідношенням:

$$W_C=1/2(CU^2), \quad (3.14)$$

де C – ємність конденсаторної батареї;

U – напруга зарядки.

Прирівнюємо потрібну енергію до енергії в конденсаторі:

$$W_C=W_{\text{маг}}=1250 \text{ Дж,}$$

$$1/2(CU^2)=1250.$$

Звідси вираз для ємності:

$$C=2W_{\text{маг}}/ U^2. \quad (3.15)$$

Виберемо напругу зарядки $U=800$ В.

Тоді:

$$C=2 \cdot 1250 / 800^2 = 6400002500 = 0,00390625 \text{ Ф.}$$

Таким чином, для напруги зарядки близько 800 В потрібна ємність конденсаторної батареї приблизно 0,0039 Ф, або на рівні 3900–4000 мкФ, щоб забезпечити імпульс енергії приблизно 1250 Дж, який, з урахуванням ККД, дає близько 1000 Дж механічної енергії удару.

Далі можна уточнювати, наприклад, для іншої напруги. Якщо, наприклад, прийняти $U=700$ В, тоді:

$$C=2 \cdot 1250 / 700^2 = 2500 / 490000 = 0,0051 \text{ Ф} = 5100 \text{ мкФ.}$$

Отже, при нижчій нарузі потрібна більша ємність, при вищій - менша.

3.3 Розрахунок пружини повернення

Розрахунок пружини повернення виконуємо з умови, що зусилля пружини на кінці робочого ходу холостого ходу не повинно перевищувати 5–10 % від робочої сили ЛДД. Максимальна електромагнітна сила двигуна прийнята $F_{\text{інд}} = 100000$ Н. Згідно з рекомендаціями, наведеними в літературі [30], приймемо верхню межу зусилля пружини як:

$$F_{\text{п,мак}} = 0,05 \cdot F_{\text{інд}} = 0,05 \cdot 100000 = 5000 \text{ Н.} \quad (3.16)$$

Деформація пружини на робочому ході повинна забезпечувати переміщення якоря на величину, близьку до ходу ЛДД, тому приймаємо $f = \delta_{\text{як}} = 25 \text{ мм} = 0,025 \text{ м}$. Жорсткість пружини визначається як відношення максимального зусилля до деформації:

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

$$k = F_{п, \max} / f = 5000 / 0,025 = 200000 \text{ Н/м.} \quad (3.17)$$

Отже, для повернення якоря та ударника в початкове положення необхідна циліндрична гвинтова пружина стиску з жорсткістю приблизно $k = 2 \cdot 10^5 \text{ Н/м}$.

Розглянемо пружину стиску з круглим перерізом витків, виготовлену зі сталевого дроту (пружинна сталь), і задамося конструктивними параметрами. Для відповідності габаритам вузла ЛІДД приймемо середній діаметр пружини $D = 40 \text{ мм} = 0,04 \text{ м}$. Кількість робочих (активних) витків позначимо через n . Жорсткість циліндричної гвинтової пружини визначається відомою залежністю:

$$k = Gd^4 / 8D^3n, \quad (3.18)$$

де G – модуль зсуву матеріалу пружини,

d – діаметр дроту,

D – середній діаметр пружини,

n – число активних витків.

Для пружинної сталі приймаємо $G = 8 \cdot 10^4 \text{ МПа} = 8 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$.

Задаємося кількістю активних витків $n = 6$ (що забезпечує достатню плавність характеристики та технологічність виготовлення), тоді з попередньої формули виразимо діаметр дроту:

$$d = 4 \sqrt{\frac{8D^3nk}{G}}. \quad (3.19)$$

Підставляємо числові значення $D = 0,04 \text{ м}$, $n = 6$, $k = 2 \cdot 10^5 \text{ Н/м}$, $G = 8 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$, обчислюємо та отримуємо:

$$d = 0,0094 \text{ м} \approx 9,4 \text{ мм.}$$

					МРМА25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, діаметр дроту пружини доцільно прийняти $d=9,5$ мм (за стандартним рядом), а середній діаметр пружини $D=40$ мм. Отримана конструкція забезпечує потрібну жорсткість на рівні $k \approx 2 \cdot 10^5$ Н/м при шести активних витках.

Перевіримо напружений стан пружини при максимальному зусиллі. Дотичне напруження зсуву в дроті гвинтової пружини стиску в першому наближенні можна визначити за формулою:

$$\tau = 8F_{п, \max} D / \pi d^3, \quad (3.20)$$

де $F_{п, \max} = 5000$ Н, $D = 0,04$ м, $d = 0,0094$ м.

Підставляючи значення, одержуємо:

$$\tau \approx 8 \cdot 5000 \cdot 0,04 / \pi \cdot (0,0094)^3 = 6,2 \cdot 10^8 \text{ Па} \approx 620 \text{ МПа}. \quad (3.21)$$

Для пружинних сталей, що використовуються в умовах циклічного навантаження, допустиме розрахункове дотичне напруження зсуву зазвичай становить 600–700 МПа. Отримане значення $\tau \approx 620$ МПа знаходиться в допустимих межах, що підтверджує правильність вибраних діаметрів дроту та середнього діаметра пружини. При цьому запас міцності можна додатково збільшити, незначно зменшивши розрахункове максимальне зусилля пружини (наприклад, до 0,04–0,045 від $F_{\text{інд}}$) або збільшивши кількість активних витків до 7 при невеликій корекції діаметра дроту за наведеною методикою.

Таким чином, розрахунок показав, що для забезпечення повернення якоря та ударника в початкове положення після виконання технологічної операції доцільно застосувати циліндричну гвинтову пружину стиску з орієнтовними параметрами: жорсткість $k \approx 2 \cdot 10^5$ Н/м, середній діаметр пружини $D \approx 40$ мм, діаметр дроту $d \approx 9,5$ мм, кількість активних витків $n \approx 6$. Така пружина забезпечує необхідний характер зусилля холостого ходу (близько 5 % від максимального робочого зусилля

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

ЛДД), не перевищує допустимих напружень у матеріалі та є технологічно придатною для виготовлення та експлуатації в складі пресового обладнання.

3.4 Висновки до третього розділу

У третьому розділі було проведено комплексний науково-технічний аналіз параметрів лінійного індукційно-динамічного двигуна, що застосовується як привід пресового обладнання. На основі вихідних даних виконано електромагнітні, енергетичні та механічні розрахунки, які дозволили оцінити можливість практичної реалізації конструкції та перевірити відповідність її характеристик технологічним вимогам. Електромагнітний розрахунок дав змогу визначити основні параметри магнітної системи, обмотки двигуна та її робочих режимів. Підтверджено, що вибрані геометричні та електричні характеристики забезпечують формування необхідного електромагнітного зусилля, а також стабільність роботи приводу в імпульсному режимі. Розрахунок енергетичних параметрів джерела живлення засвідчив достатність запропонованої ємнісної схеми для створення потрібного імпульсу електричної енергії та ефективність її перетворення у механічну роботу.

Додатково проведено розрахунок пружинного елемента, який забезпечує повернення рухомої системи двигуна у вихідне положення після завершення технологічного циклу. Результати підтвердили, що застосування пружини є доцільним з точки зору динаміки роботи приводу, надійності та простоти конструктивної реалізації.

Узагальнюючи результати розрахунків, можна стверджувати, що конструкція лінійного індукційно-динамічного двигуна та параметри пресового обладнання узгоджені між собою і забезпечують виконання необхідних ударних технологічних операцій. Проведені дослідження створюють основу для подальшої розробки, оптимізації та деталізації конструкції обладнання, а також підтверджують його працездатність та відповідність вимогам галузевого машинобудування.

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

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі виконано повний цикл науково-технічних досліджень, спрямованих на розробку пресового обладнання з двосекційним лінійним індукційно-динамічним двигуном (ЛІДД), призначеного для виконання технологічних операцій вирубкування та перфорації деталей з полімерних і композиційних матеріалів у галузевому машинобудуванні. Проведена робота ґрунтується на аналізі сучасних технологічних процесів, технічних рішень та патентних джерел, а також на виконанні необхідних електромагнітних, конструктивних і енергетичних розрахунків.

У першому розділі здійснено огляд технологічних процесів та обладнання пресової й ударної дії, в якому визначено їхні конструктивні особливості, енергетичні принципи роботи та обмеження традиційних приводів - гідравлічних, пневматичних і електромеханічних. На основі проведеного аналізу обґрунтовано доцільність застосування лінійних електричних двигунів, зокрема індукційно-динамічного типу, як приводу ударних машин завдяки їх високій швидкодії, прямолінійному характеру руху робочого органу та можливості дискретного енергетичного перетворення.

Патентний огляд дозволив встановити, що більшість існуючих технічних рішень орієнтовані на електромагнітні приводи, тоді як застосування ЛІДД у промислових пресах зустрічається рідко, що підтверджує актуальність створення нового обладнання даного типу. Водночас аналіз наявних конструкцій показав, що індукційно-динамічні двигуни мають значний потенціал підвищення питомих зусиль і працездатності, особливо у малогабаритних настільних пресах.

У другому розділі розроблено конструктивну схему пресового обладнання та структурну схему його приводу, визначено вихідні дані для проектування ЛІДД, сформовано технічні вимоги до основних вузлів та запропоновано конструкції механічної частини приводу, системи повернення, оснастки та механізмів ре-

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

гулювання. Розроблено загальний вигляд обладнання, забезпечено його компоновку, ергономічність та доступність обслуговування. Визначено принцип роботи пресового обладнання та детально описано взаємодію його структурних елементів під час технологічного циклу.

У третьому розділі виконано електромагнітний розрахунок ЛДД, встановлено основні параметри магнітопроводу, обмотки та імпульсної системи живлення. Проведений аналіз підтвердив можливість отримання необхідного тягового зусилля та ходу робочого органу, що забезпечує працездатність пресового обладнання при виконанні операцій вирубування та перфорації. Розрахунок пристрою живлення та управління довів ефективність застосування ємнісного накопичувача для формування імпульсів струму, а проведений розрахунок пружини повернення підтвердив її відповідність вимогам до швидкодії, надійності та циклічності роботи приводу.

Узагальнюючи результати виконаної магістерської роботи, можна зробити висновок, що поставлена мета - розробка конструкції пресового обладнання з дво-секційним лінійним індукційно-динамічним двигуном та обґрунтування його робочих параметрів - успішно досягнута. Розроблене обладнання є технічно обґрунтованим, конструктивно завершеним та може бути рекомендоване для подальшої експериментальної перевірки, виготовлення дослідного зразка та впровадження у виробничі процеси галузевого машинобудування.

Отримані наукові та технічні результати підтверджують ефективність застосування ЛДД як приводу ударних машин, що відкриває перспективи для створення нового покоління енергоефективного та високошвидкісного пресового обладнання.

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

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Поліщук О. С., Прибега Д. В., Чумакова С. В. Перспективи застосування імпульсного лінійного електромагнітного приводу в пресовому обладнанні. Вісник Хмельницького національного університету, №5, 2009. – 11 с.
2. Бабич В. І. Основи машинобудування. – К.: Кондор, 2018. – 356 с.
3. Сокіл М. В., Пелех Л. Й. Технологія машинобудування. – Львів: Афіша, 2017. – 412 с.
4. Слободян М.М., Ткачук В.С. Верстати та автоматичні лінії. – Тернопіль: ТНТУ, 2016. – 280 с.
5. Kalpakjian S., Schmid S. Manufacturing Processes for Engineering Materials. 6th ed. – Pearson, 2017. – 984 p.
6. Groover M.P. Fundamentals of Modern Manufacturing. Wiley, 2020. – 1024 p.
7. Васильєв Г.Ф. Механізація та автоматизація технологічних процесів. – К.: Ліра, 2015. – 375 с.
8. Гайдук А. М., Сторожук І. М. Технологічні процеси обробки матеріалів тиском. – К.: НАУ-друк, 2019. – 268 с.
9. Bralla J.G. Handbook of Manufacturing Processes. – McGraw-Hill, 2020. – 1150 p.
10. Гевко Б.І., Гевко Р.Б. Обладнання та процеси механообробки. – Тернопіль: ТНТУ, 2018. – 312 с.
11. Львов В. А. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні. – Харків: ХПІ, 2014. – 265 с.
12. Слюсар А. Л., Колесник М. М. Гідравлічні та пневматичні приводи. – К.: КНЕУ, 2016. – 295 с.
13. Bolton W. Pneumatic and Hydraulic Systems. – Newnes, 2015. – 168 p.
14. Електромеханічні системи та приводи: навч. посіб. / За ред. Ю. В. Ковальова. – К.: КПІ ім. І. Сікорського, 2017. – 420 с.

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

15. Fitzgerald A., Kingsley Ch., Umans S. Electric Machinery. – McGraw-Hill, 2013. – 708 p.
16. Bulat A., Mezentsev A. Linear electric motors in industrial applications. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 2019. – pp. 91–98.
17. Поліщук О.С. Підвищення ефективності пресового обладнання для виконання операцій легкої промисловості: дис. ... канд. техн. наук. – КНУТД, 2001. – 165 с.
18. Yang Shuaimin, Li Zhenbo, Ma Dabang. Electromagnetic press. Пат. Китай №2230657U, МПК В30В 1/42. Заявл. 25.04.1995; Опубл. 10.07.1996.
19. Smolinski Slavomir. Linear electromagnetic motor. Пат. Польща №290827A1, МПК Н02К 33/08. Заявл. 27.07.1991; Опубл. 13.01.1992.
20. Takahara Hiroyuki та ін. Optical equipment. Пат. Японія №4293005A2, МПК G02В 07/04. Заявл. 22.03.1991; Опубл. 16.10.1992.
21. Young, Nies O. Electromagnetic fuel injector linear motor and pump. Пат. США №5351893, МПК В05В 01/30. Заявл. 26.05.1993; Опубл. 04.10.1994.
22. Поліщук О.С., Кармаліта А.К., Прибега Д.В. Прес для вирубування деталей взуття. Пат. України №5351893, МПК А43D 8/26. Заявл. 26.05.1993; Опубл. 04.10.1994.
23. Кармаліта А.К., Піскорський Г.А., Скиба М.Є. Методика математичного моделювання технології та механізмів легкої промисловості. – К.: ІЗМН, 1997. – 184с.
24. Кармаліта А.К., Поліщук О.С. Перспективи застосування електромагнітних приводів в легкій промисловості. “Вісник технологічного університету Поділля”.-Хмельницький: ТУП 1997 №1 Ч.2.- С.131-133.
25. Поліщук О.С. Експериментальна установка для дослідження електромагнітного привода в пресовому обладнанні // Вісник технологічного університету Поділля. -Хмельницький: ТУП. – 2000. - №. 3. Ч.2. – С.93-96.

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

27. Ю.С. Калиниченко, А.І. Кузнецов. Тягові електричні машини. Двигуни постійного струму: Навч. посібник. (для студентів денної та заочної форм навчання 3–5 курсів спеціальності 7.092202 – Електричний транспорт) – Харків: ХНАМГ, 2004.– 218 с.

28. Болюх В.Ф. Розрахунок параметрів електротехнічних пристроїв : навч. посібник/В.Ф. Болюх, С.М. Кожемякін, В.С. Марков. – Харків: НТУ «ХП», 2016. – 120 с.

29. Лютенко Л.А. Розрахунок та вибір основних елементів магнітно-імпульсної устатковини: навч.-метод. посібник / Л. А. Лютенко – Харків : НТУ «ХП», 2023. – 107 с.

30. Роганов Л.Л., Еарнаух С.Г. Розрахунок пружин, ресор, та пружних амортизаторів. Навчальний посібник. – Краматорськ: ДДМА, 2000. – 112с.

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

ДОДАТОК А

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