

Хмельницький національний університет

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Удосконалення електрогідравлічного пресу з використанням системи накопичення енергії

Назва теми

Галузь знань 13 «Механічна інженерія»

Шифр, назва

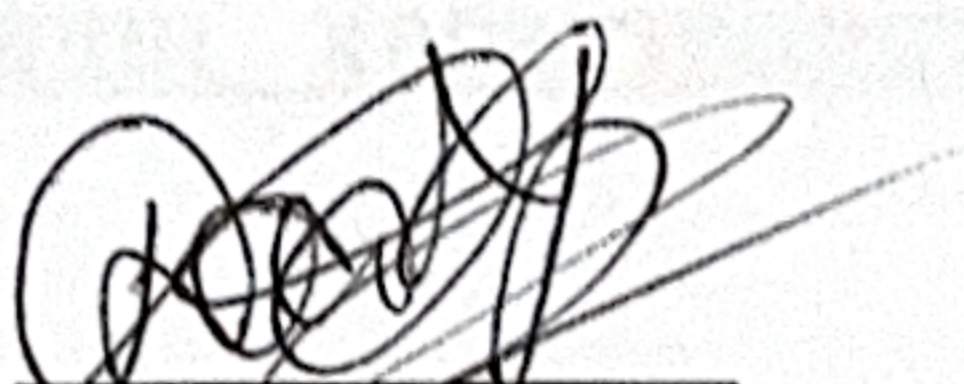
Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»

Шифр, назва

Освітня програма «Машини і апарати легкої промисловості»

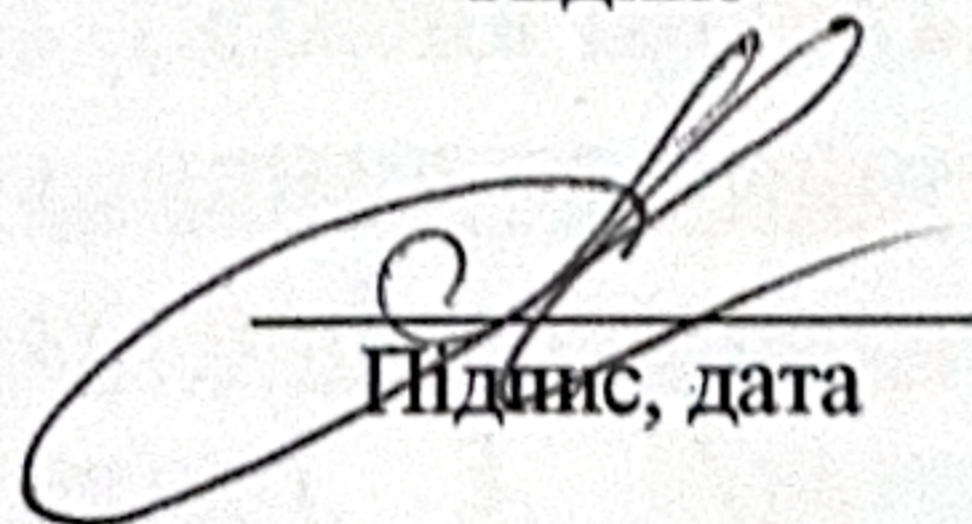
Шифр МРМА 24.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 2 курсу  
група МБм-23-1

  
Підпис

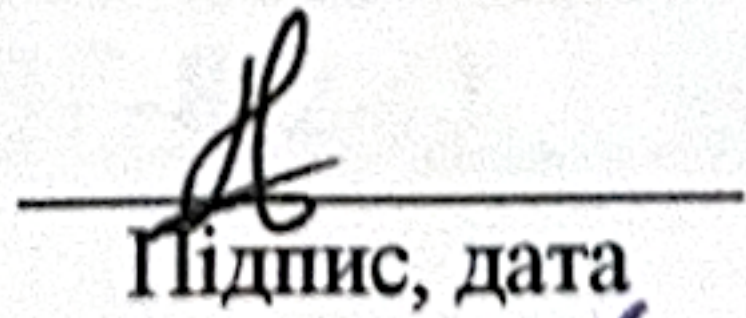
Дабічев І.І.  
Ініціали, прізвище

Керівник

  
Підпис, дата

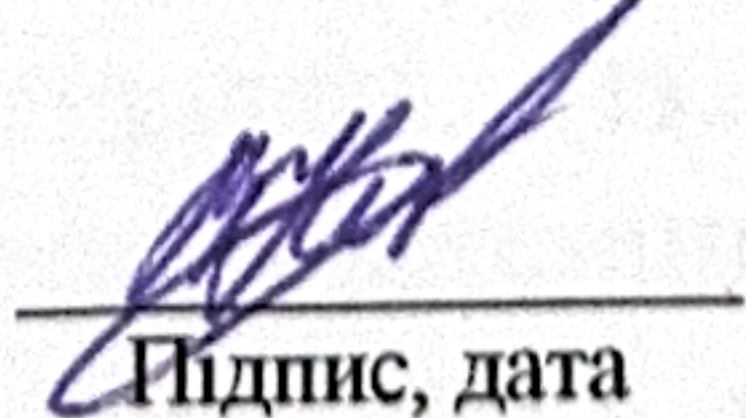
проф. Поліщук О.С.  
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер

  
Підпис, дата

С.І. Луканич  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

  
Підпис, дата

доц. Неймак В.С.  
Ініціали, прізвище

Зав. кафедри МАЕЕС

17 12 2024 р.

Хмельницький 2024

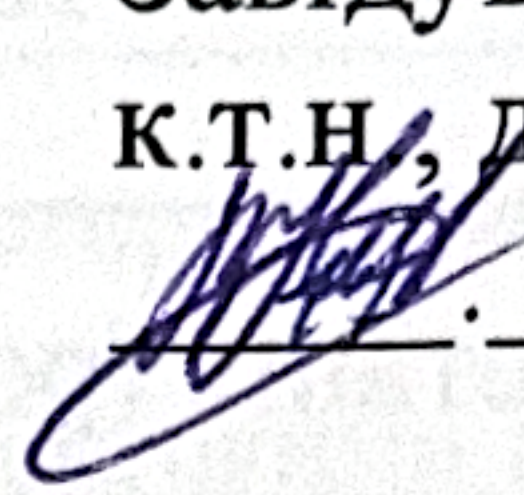
# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

к.т.н., доц. Неймак В.С.

 12 .2024р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Дабічев Ігор Ігорович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Удосконалення електрогідравлічного пресу з використанням системи накопичення енергії

керівник роботи д.т.н., проф. Поліщук О.С.

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

Затверджено наказом ректора університету від 26 08 2024 р. № 60

2. Строк подання студентом роботи на кафедру \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи Технічні характеристики пресів аналогів та матеріалів

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

Вступ. 1. Огляд пресового обладнання та енергозберігаючих рішень у легкій промисловості. 2. Розробка енергоефективного накопичувача для пресового обладнання легкої промисловості. 3. Розрахунок махового колеса для електрогідравлічного пресу ПВГ-8-2-О. Висновки. Перелік джерел посилання.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) Аркуш 1. Вирубне пресове обладнання. Документ оглядовий (А1). Аркуш 2. Пристрої накопичення кінетичної енергії. Документ оглядовий (А1). Аркуш 3. Прес ПВГ-8-2. Вид загальний (А1). Аркуш 4. Прес-8-2. Схема гідравлічна (А1). Аркуш 5, 6. Прес ПВГ-8-2 (Гідропривід). Вид загальний (А1). Аркуш 7. Збалансований супер маховик. Складальне креслення (А1). Аркуш 8. Пристрій для контролю швидкості. Схема комбінована (А1). Аркуш 9. Верхня напівмуфта (А2)+Нижня напівмуфта (А2). Документ технологічний.

### 6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

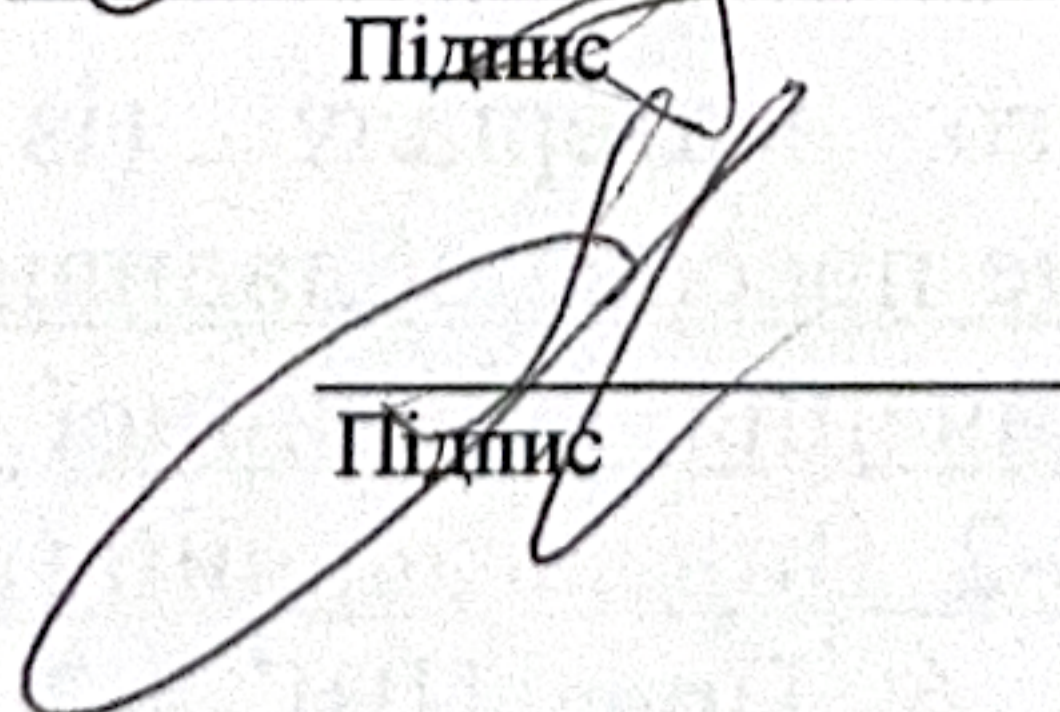
Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Огляд пресового обладнання та енергозберігаючих рішень у легкій промисловості	до 30.10.22р.	
2. Розробка енергоефективного накопичувача для пресового обладнання легкої промисловості	до 10.11.22р.	
3. Розрахунок махового колеса для електрогідравлічного пресу ПВГ-8-2-О	до 20.11.22р.	
4. Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу	до 12.12.22р.	

Студент

  
Підпис

І.І. Дабічев  
Ініціали, прізвище

Керівник роботи

  
Підпис

О.С. Поліщук  
Ініціали, прізвище

# АНОТАЦІЯ

до магістерської роботи студента  
спеціальності 133 «Галузеве машинобудування».

1. Прізвище, ім'я та по батькові Дабічев Ігор Ігорович


2. Тема магістерської роботи Удосконалення електрогідравлічного пресу з використанням системи накопичення енергії

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

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 9 арк., сторінок записки 77

Прес ПВГ-8-2-О, зокрема, характеризується високими піковими навантаженнями під час роботи, що призводить до перевантаження двигуна. Це спричиняє прискорений знос його компонентів, знижує продуктивність і підвищує витрати на обслуговування. Для оптимізації роботи преса та зниження навантажень на двигун пропонується встановлення махового колеса на вал двигуна. Впровадження маховика як частини конструкції пресового обладнання підвищило ефективність роботи устаткування та створило передумови для його широкого впровадження у промисловості. Тому тема магістерської роботи є актуальною. В першому розділі проведено огляд пресового обладнання та енергозберігаючих рішень у легкій промисловості. В другому здійснено розробку енергоефективного накопичувача для пресового обладнання легкої промисловості. В третьому розділі виконано розрахунок махового колеса для електрогідравлічного пресу ПВГ-8-2-О.

Підпис студента



" 17 " 12 20 24 р.

## РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 1 від " 23 " 12 20 24 р.

Оцінка проекту ЕК добре

Рекомендації ЕК \_\_\_\_\_

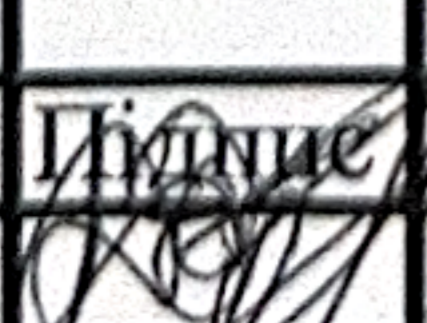
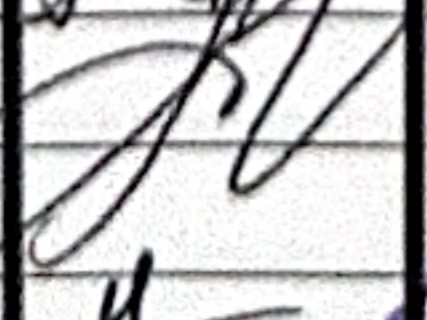
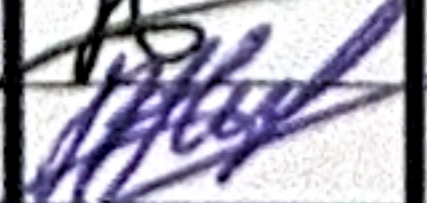
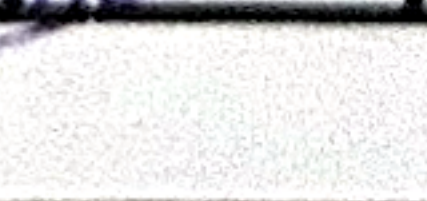
Особливі відмітки \_\_\_\_\_

Технічний секретар \_\_\_\_\_

" 23 " 12 20 24 р.

# ЗМІСТ

		стор.
	Вступ	6
1	Огляд пресового обладнання та енергозберігаючих рішень у легкій промисловості	8
1.1	Технології та обладнання для вирубування в легкій промисловості	8
1.2	Технологічні рішення для накопичення кінетичної енергії в легкій промисловості	20
1.3	Висновки до першого розділу	35
2	Розробка енергоефективного накопичувача для пресового обладнання легкої промисловості	37
2.1	Розробка конструкції махового колеса для підвищення ефективності преса ПВГ-8-2	37
2.2	Розробка електричних схем регулювання швидкості та тиску для виробничих механізмів	39
2.3	Висновки до другого розділу	43
3	Розрахунок махового колеса для електрогідравлічного пресу ПВГ-8-2-О	44
3.1	Інженерний розрахунок посадки махового колеса з натягом	44
3.2	Розрахунок і підбір електродвигуна для системи накопичення кінетичної енергії	48
3.3	Розрахунок розмірів і конструктивних особливостей махового колеса	50
3.4	Розрахунок параметрів міцності махового колеса	69
3.5	Висновки до третього розділу	71

МРМА24.00.00.000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
Виконав		Дабічев		
Перевір.		Поліщук		
Н.контр.				
Затвер.		Неймак		
Удосконалення електрогідравлічного пресу з використанням системи накопичення енергії			Літера	Аркуш
Пояснювальна записка			М	Аркушів
			4	77
			ХНУ гр.МБм-23-1	

Висновки	73
Перелік джерел посилання	74
Додаток А	

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## ВСТУП

У машинобудівній, взуттєвій та швейній промисловостях забезпечення надійної роботи пресового обладнання та дотримання правильного технологічного процесу під час його експлуатації є однією з ключових проблем. Сучасне обладнання, як-от прес ПВГ-8-2-О, використовуваний для вирубування деталей із товстої шкіри та інших матеріалів, вимагає значної кількості енергії для виконання процесу вирубування. Однак його експлуатація пов'язана з низкою технічних викликів, серед яких - значні динамічні навантаження на двигун і насос, які негативно впливають на ефективність та довговічність обладнання.

Прес ПВГ-8-2-О, зокрема, характеризується високими піковими навантаженнями під час роботи, що призводить до перевантаження двигуна. Це спричиняє прискорений знос його компонентів, знижує продуктивність і підвищує витрати на обслуговування. Для оптимізації роботи преса та зниження навантажень на двигун пропонується встановлення махового колеса на вал двигуна [1].

Махове колесо здатне накопичувати кінетичну енергію під час періодів холостого ходу двигуна та використовувати її для компенсації навантажень у момент вирубування. Такий підхід дозволяє зменшити максимальну потужність, яку повинен забезпечувати двигун, що сприяє економії електроенергії, зниженню навантажень на двигун та збільшенню його довговічності. Це рішення також сприятиме загальному зниженню експлуатаційних витрат і підвищенню надійності пресового обладнання [2].

Історія використання маховиків сягає глибокої давнини. Відомості про їх застосування можна знайти ще в середньовічній літературі. Прототипом маховика можна вважати гончарний круг, який активно використовувався у стародавні часи. У період промислової революції маховики стали ключовими елементами багатьох механізмів, де виконували функції стабілізації руху та накопичення енергії. Навіть у сучасних автомобілях маховики відіграють важливу роль, згладжуючи перепади потужності, що передається від двигуна до трансмісії.

					MPMA24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Впровадження маховика як частини конструкції пресового обладнання відображає прагнення адаптувати перевірені часом технології до сучасних викликів виробничих процесів. Це підкреслює важливість проведення подальших досліджень і розробок у цьому напрямку. Застосування інноваційних підходів, що базуються на поєднанні сучасних і традиційних технічних рішень, здатне не лише підвищити ефективність роботи обладнання, але й створити передумови для його широкого впровадження у промисловості. Тому тема магістерської роботи є актуальною.

					MPMA24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

# 1 ОГЛЯД ПРЕСОВОГО ОБЛАДНАННЯ ТА ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ РІШЕНЬ У ЛЕГКІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

## 1.1 Технології та обладнання для вирубування в легкій промисловості

Проведений аналіз пресового обладнання показав, що воно характеризується значними енерговитратами, високим ступенем зносу двигуна, нерівномірністю підтримання тиску в системі, а також інколи недостатньою якістю прорубування матеріалу. На існуючому пресовому обладнанні удосконалення майже не проводилися.

Прес електрогідравлічний траверсний ПВГ-18-2 використовується для вирубування деталей низу взуття з натуральної шкіри та штучних шкір, а також для обробки деталей з гуми, текстилю й інших штучних матеріалів [3]. Процес вирубування виконується за допомогою різаків на алюмінієвій плиті, покритій ізолюючою плівкою, або на неметалевій плиті чи колоді.

Цей прес є електрогідравлічним траверсним пристроєм одноударної дії, обладнаним ножним вимикачем і системою захисту рук працівника.

Якщо робітник торкнеться неізольованих частин різака, або за умови контакту напівпровідникового приладу, з'єданого з вирубною плитою, вмикання траверса блокується. Захист здійснюється за допомогою напівпровідникового пристрою захисту рук (ППЗР), який автоматично зупиняє траверсу.

Для виконання удару траверси працівнику необхідно натиснути ногами на педаль, розташовані в нижній частині корпусу преса.

Прес складається з таких основних елементів:

- основа,
- траверса з направляючими,
- механізм підйому ударника,
- система захисту рук,
- гідравлічне та електричне обладнання.

					MPMA24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		



Нижня траверса 5 встановлена на лівій 32 та правій 28 чавунних стійках, які закріплені на рамі 29. Верхня траверса 18 фіксується до корпусів 11 і 20 за допомогою двох пустотілих скалок 10 і 21, встановлених у направляючих 6 і 25 станини преса.

До нижньої частини кожної направляючої станини кріпиться фланець 1 із трапецієподібною різьбою, у якій вкручені штоки 4. На цих штоках розташовані поршні 3. У процесі роботи преса поршні залишаються нерухомими. Робочими циліндрами є скалки 10 і 21, у нижній частині яких на різьбі закріплено дно 2. Робоча порожнина циліндра знаходиться між дном 2 та поршнем 3.

Привід преса складається з електродвигуна 17, двох зубчастих коліс 15 і 16, валиків 14 і 19, а також трьох муфт 13. Муфти 13 з'єднані з черв'ячними колесами 12. При ввімкненні електродвигуна 17 обертання передається через зубчасту передачу 15 і 16, потім через черв'ячні передачі обох скалок, далі на тяги 9, що впливають на штоки 4. Штоки, вкручуючись у фланці 1 або вивертаючись із них, забезпечують відповідне опускання або піднімання скалок 10 і 21 разом із траверсою 18.

Включення преса для виконання операції вирубування здійснюється за допомогою ножної педалі 30, закріпленої у стійках.

Недоліками даного преса є швидкий знос вирубною плити через високі навантаження, зношення направляючих траверси та значні витрати електроенергії.

Прес ПВГ-8-2-О [4].

Призначення преса.

Електрогідравлічний консольний прес ПВГ-8-2 використовується для вирубування деталей верху взуття з натуральної шкіри та штучних матеріалів різакми з гострим заточеним лезом на алюмінієвій плиті з ізоляційною плівкою. У випадку роботи з волокнистими штучними матеріалами замість металевих плит застосовуються неметалеві.

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Прес має електрогідравлічний привід і функцію автоматичного повороту ударника. Контроль роботи здійснюється двома кнопками, розташованими з обох сторін робітника на кронштейнах.

Процес роботи.

1. Матеріал укладають на вирубну плиту, після чого на нього встановлюють різак.
2. Оператор натискає одночасно праву і ліву кнопки для запуску ударника.
3. Ударник з вихідного положення автоматично повертається, зупиняється над центром вирубної плити, виконує робочий хід, а потім повертається у вихідне положення.
4. Підняття ударника здійснюється завдяки енергії стиснутого повітря, що накопичується в пустотілій скалці преса.
5. Після повернення ударника деталь забирають, переставляють різак, і цикл повторюється.

Конструкція преса.

Прес ПВГ-8-2-0 складається з таких основних компонентів:

- основа;
- ударник;
- механізм повороту ударника;
- механізм підйому ударника;
- гідравлічне обладнання;
- електрообладнання.

Технічна характеристика преса ПВГ-8-2-0:

- продуктивність: 285 пар деталей на годину;
- максимальне зусилля прорубування: 98 кН (10 000 кгс);
- хід ударника (регульований): 0–30 мм;
- виліт ударника: 720 мм;
- розміри робочої площі ударника: 500 × 450 мм;

						МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата			11

- відстань між площинами ударника і столу: 85–185 мм;
- периметр вирубаних деталей на металевій плиті: 1100 мм;
- робочий тиск у гідросистемі: 9,8 МН/м<sup>2</sup> (100 кгс/см<sup>2</sup>);
- обсяг масла в маслобаку: 70 дм<sup>3</sup>;
- потужність електродвигуна гідроприводу: 1,1 кВт;
- потужність механізму підйому ударника: 0,12 кВт;
- розміри:
- по фронту: 1280 мм;
- глибина: 1050 мм;
- висота: 1500 мм;
- маса: 1100 кг.

#### Конструкція преса.

Прес ПВГ-8-2-0 складається з:

- станини,
- механізму ударника,
- гідравлічного обладнання,
- електрообладнання.

Станина преса включає основу 1 (рис.1.2, аркуш [МРМА24.00.00.000ДО1]) і корпус 14, інтегрований зі столом. Корпус з'єднаний із чотирма основними стаканами 21. На столі преса встановлюється металева вирубна плита 7, ізолювана прокладкою, і підключається через перший технологічний контакт 8 до електричної системи управління пресом.

Вирубна плита покрита алюмінієвою накладкою з ізолюючою плівкою. У разі потреби замість металевої плити можна використовувати неметалеву плиту або колоду.

Усередині станини розташовано гідропривід 3, а праворуч — електрошафа. Передній знімний щит 2, задній щит 18, а також бокові щити призначені для захисту гідроприводу.

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		12

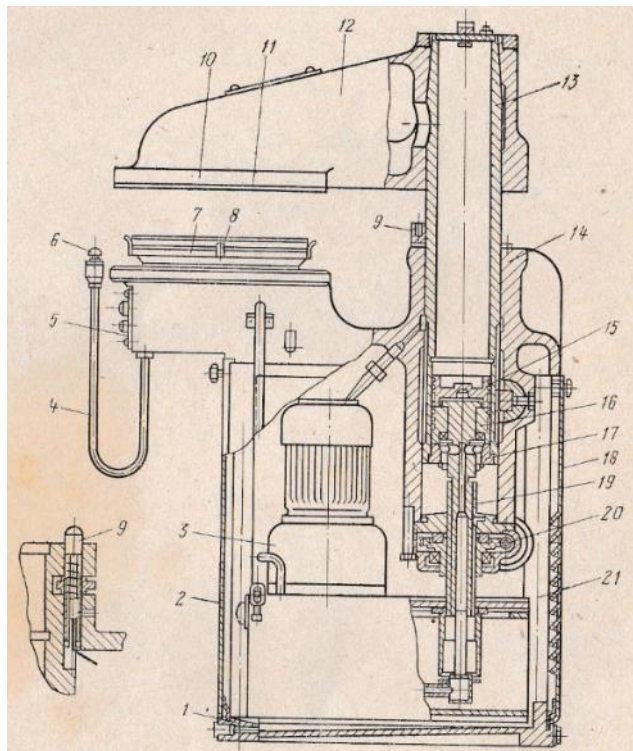


Рисунок 1.2 – Поперечний розріз преса ПВГ-8-2-О

На передній частині станини знаходяться два кронштейни 4 з долонними кнопками 6, контрольним механізмом 5 із кнопками управління, два знімних допоміжних столики та кронштейн для навішування шкіри.

Другий технологічний контакт 9, що складається з гвинта та гайки, інтегрований у корпус 14 під ударником 12.

Механізм ударника включає вертикальні циліндричні направляючі станини, в яких встановлена скалка 13 з ударником 12, закріпленим на верхньому кінці за допомогою гайки. До нижньої частини ударника 12 прикріплена знімна амортизаційна плита 10 з контактною пластиною 11, яка використовується при роботі на металевих плитах.

Нижня частина скалки 13 виконує функцію робочого циліндра, в якому знаходиться нерухомий робочий поршень 16, жорстко закріплений на штоку 19. Над поршнем 16 вільно розташований плаваючий поршень 15. До нижньої частини циліндра прикріплена кришка 17.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА24.00.00.000 ПЗ

Арк.  
13

У верхній частині скалки встановлено зворотний клапан, який служить для заповнення порожнини скалки над поршнем 15 стиснутим повітрям з тиском 0,5 МПа. Акумулятована енергія стисненого повітря використовується для автоматичного підняття ударника після завершення вирубубування деталі.

Робоча порожнина гідроциліндра між поршнем 16 та кришкою 17 з'єднана з трубопроводом гідроприводу через отвір у штоку 19. Нижній кінець штока має різьблення і вкручений у черв'ячне колесо 20, яке дозволяє регулювати ударник за висотою та налаштувати величину його ходу.

Робота гідроприводу.

Гідропривід функціонує наступним чином.

Після натискання на пускову кнопку активується електродвигун насоса 2 (рис.1.3), який з'єднується з електричною схемою, що керує пресом. Прес здійснює холостий хід, а на пульті керування вмикається індикаторна лампочка, яка свідчить про готовність преса до роботи.

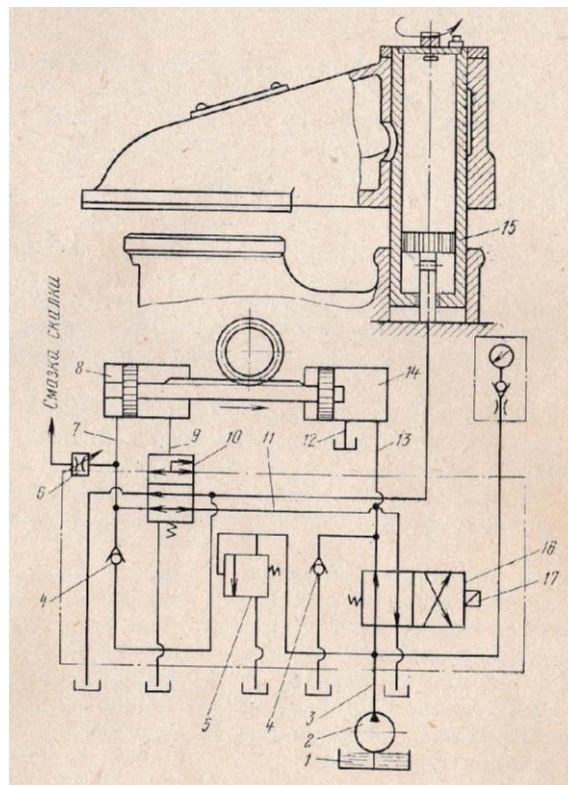


Рисунок 1.3 – Гідрравлічна принципова схема преса  
ПВГ-8-2-О

					MPMA24.00.00.000 ПЗ	Арк. 14
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Мастило, що подається від насоса 2 через трубопровід 3, проходить через золотник 16, а потім по трубопроводу 13 надходить у циліндр 14 відведення ударника. Далі мастило через трубопровід 12 зливається назад у бак 1. У цей момент тиск у системі відсутній.

Коли натискають долонні кнопки, активується електромагніт 17 золотника 16, який перемикає золотник. У результаті мастило від насоса 2 через трубопроводи 11 та 7 надходить у циліндр 8 підведення ударника. Ударник переміщується в робоче положення.

Після завершення повороту мастило через отвір у циліндрі 8 і трубопровід 9 спрямовується до золотника 10, що перемикає потік мастила у робочий циліндр 15. Під впливом тиску мастила, яке долає силу стисненого повітря, скалка разом з ударником опускається вниз, виконуючи вирубування матеріалу.

Процес відновлення роботи преса після вирубування.

Після завершення вирубування деталі електромагніт золотника 16 вимикається, і золотники 16 та 10 повертаються у вихідне положення. Енергія стисненого повітря, яка накопичується у скалці, піднімає ударник у верхнє положення. Потік мастила від насоса 2 через золотник 16 спрямовується у циліндр 14 для відведення ударника, здійснюючи його поворот у вихідне положення. Після цього мастило знову зливається в бак, і система готова до нового робочого циклу.

Регулювання системи.

1. Запобіжний клапан (5). Налаштовується заводом-виробником на максимальний робочий тиск і в експлуатаційних умовах регулюванню не підлягає.

2. Змащування скалки преса. Виконується через змащувальний кран 6. Кількість мастила для змащення можна регулювати.

3. Клапани низького тиску (4). Розташовані в системі повороту ударника, вони виконують роль амортизаторів, компенсуючи інерційні маси на початковому етапі руху ударника.

Можливі несправності преса.

1. Ударник не рухається при натисканні долонних кнопок.

					MPMA24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Причини:

- заклинив розподільчий золотник 16;
- перегоріла котушка електромагніту 17;
- зламаний або вилетів з'єднувальний палець між золотником і сердечником електромагніту;
- несправні долонні кнопки.

2. Ударник не повертається у вихідне положення після вирубування матеріалу.

Причини: відсутність контакту між вирубною плитою і технологічним контактом, зламана або ослаблена пружина золотника 16, низький тиск повітря в скалці.

3. Матеріал не вирубується, а ударник не повертається у вихідне положення при використанні різака з великим периметром.

Причини: неправильне регулювання запобіжного клапана 5, пошкодження насоса 2, зношені поршневі кільця в робочому циліндрі 15, ослаблені з'єднання трубопроводів.

Прес електрогідравлічний з відвідною траверсою ПОТГ-40 [4].

Прес ПОТГ-40 використовується в легкій промисловості для вирубування деталей з багатошарових настилів текстилю та штучних матеріалів (рис. 1.4, аркуш [МРМА24.00.00.000ДО1]).

Призначення преса.

Прес призначений для вирубування деталей верху взуття за допомогою гострих різаків із багатошарових настилів тканин і штучних матеріалів на алюмінієвій плиті. Подача матеріалу в зону вирубування здійснюється за допомогою спеціального подаючого пристрою. Прес є електрогідравлічним, з відвідною траверсою, одноударної дії, оснащений ручним ввімкненням.

Принцип роботи.

Матеріал розстеляється на вирубній плиті, після чого на нього встановлюється різак. Для початку роботи правою рукою натискають на праву долонну

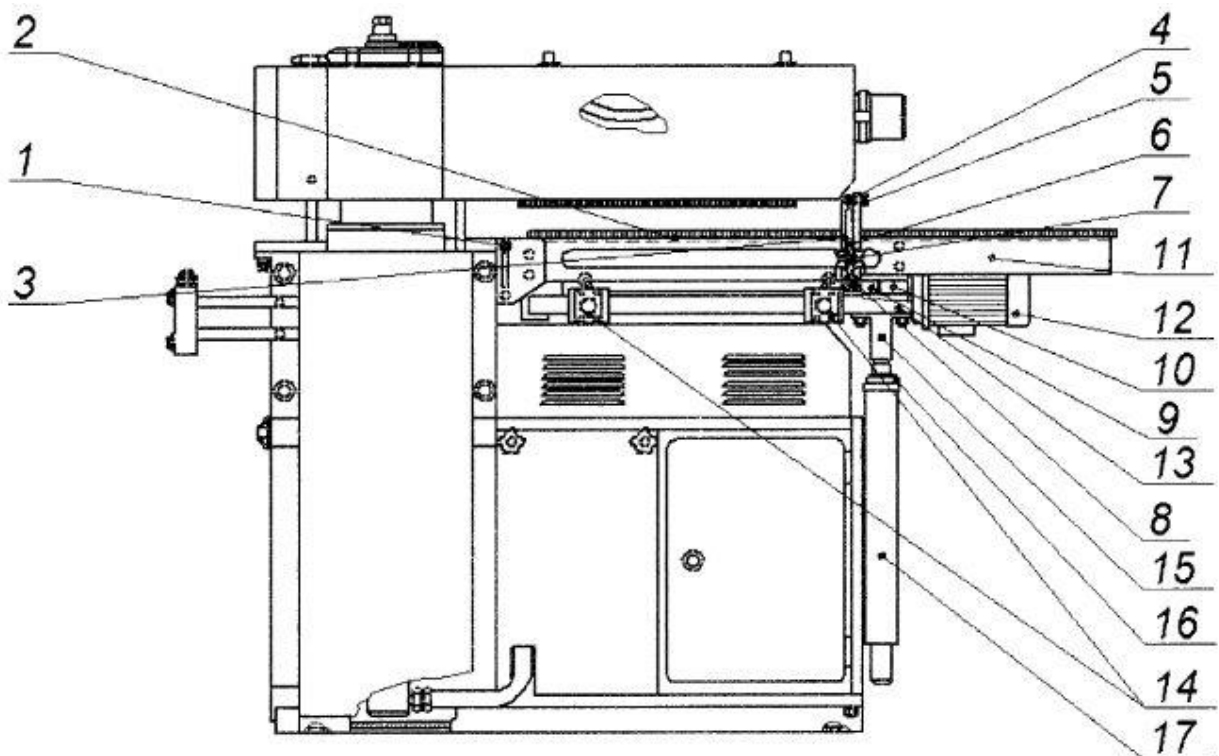
					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						16
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

кнопку, а лівою - на ліву. Ударник переходить із вихідного у робоче положення, виконує робочий хід і автоматично повертається у вихідне положення.

#### Конструкція преса.

Прес складається з наступних елементів: основи, ударника з направляючими, механізму відведення, механізму опускання, гідравлічного обладнання, електрообладнання.

Переваги преса: легкий доступ до вирубаного матеріалу, можливість вирубування більшої площі матеріалу.



1 – дві жорсткі муфти; 2 – лист рухомий; 3 – пази стійок; 4 – валик притисний; 5 – фіксатор; 6 – маховик; 7 – вал; 8 – вісь; 9 – гайка; 10 – ходовий гвинт; 11 – направляючі рухомого листа; 12 – електричний двигун; 13 – скалки цільні з траверсою; 14 – кінцевий вимикач; 15 – дозатор-прискорювач; 16 – гайка; 17 – кронштейн.

Рисунок 1.4 – Прес ПОТГ-40:

При натисканні на обидві кнопки одночасно обома руками включається робочий хід траверси. Кнопки для запуску траверси розташовані на передній панелі преса, і якщо натиснуто тільки одну кнопку, траверса не активується.

Недоліки преса ПОТГ-40:

- значне споживання електроенергії;
- зношення направляючих ударника;
- незручне завантаження матеріалу та різака в робочу зону преса.

Прес вирубний Compart C06 [5].

Прес Compart C06 з ручним поворотом ударника застосовується у взуттєвій та шкіргалантерейній промисловості. Попри те, що він не обладнаний автоматичним поворотом ударника, як наприклад, преси ПКП-10 [6] або Atom [7, 8], модель Compart C06 зручна в роботі. Її головною перевагою є точне та зручне налаштування електроніки і контроль тиску мастила в системі, що забезпечує якісне вирубання матеріалів (рис. 1.5, аркуш [МРМА24.00.00.000ДО1]).

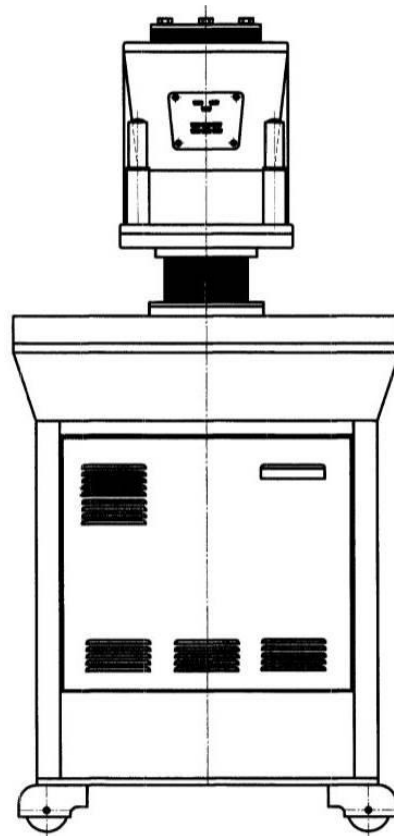


Рисунок 1.5 – Вирубний прес Compart C06

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА24.00.00.000 ПЗ

Арк.  
18

Прес Compart C06 є зручним обладнанням для швидкої вирубки матеріалів, таких як поролон, багатошаровий папір, тканини, гума. Його конструкція дозволяє налаштовувати висоту підйому ударника і глибину (зусилля) прорубування відповідно до вимог виробника за допомогою панелі електронного управління [5].

Панель управління розташована безпосередньо на поворотному ударнику, що забезпечує зручність у користуванні. Для додаткової зручності на передній панелі встановлений електронний лічильник вирубаних деталей, що полегшує контроль над процесом вирубання.

Перед початком роботи проводиться тестовий удар для встановлення оптимального зусилля прорубування під конкретний різак. У разі необхідності додаткових налаштувань, точність остаточної позиції прорубування може бути встановлена з кроком до 0,1 мм за допомогою кнопок на панелі управління.

У конструкції преса відсутній кінцевий вимикач. Контроль вертикального положення ударника здійснюється за допомогою прецизійного потенціометра, що забезпечує точність та стабільність у роботі.

Недоліки вирубного преса:

Гідравлічне обладнання преса виходить з ладу рідко, за умов своєчасної заміни масла та дотримання правил експлуатації. Основні несправності зазвичай пов'язані з електронними схемами:

1. Неправильне позиціонування ударника по вертикалі.

Причина: несправність або ослаблення кріплення потенціометра положення.

Рішення: закріпити потенціометр, при необхідності промити спиртом. Якщо це не допомогло, потенціометр слід замінити.

2. Несправність кнопок ударника.

Рішення: прочистити кнопки або замінити їх.

3. Нестабільна робота електроніки.

Рішення: перевірити напругу живлення на платі, очистити контакти реле.

					MPMA24.00.00.000 ПЗ	Арк. 19
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

На основі проведеного аналізу пресового обладнання було обрано вирубний прес ПВГ-8-2-О з поворотом ударника для вдосконалення пристрою накопичення кінетичної енергії. Цей вибір зумовлений наявністю значних недоліків у роботі, які негативно впливають на процес вирубання та потребують вирішення.

## 1.2 Технологічні рішення для накопичення кінетичної енергії в легкій промисловості

Пошук пристроїв для накопичення кінетичної енергії показав, що практично відсутні дослідження, спрямовані на вдосконалення махових коліс, які застосовуються в легкій промисловості [9, 10]. Такі колеса є важливими допоміжними елементами, від яких залежить якість вирубання текстильних і шкіряних матеріалів, а також ефективне використання електроенергії.

Супермаховик трикутної форми (рис. 1.6, аркуш [МРМА24.00.00.000ДО2]) представляє собою тіло обертання, яке складається з [11, 12]:

- маточини (1) – центрального елемента конструкції;
- диска (2) – основи для обода;
- обода (3) – виготовленого з намотки волочильного дроту.

Обід виконаний таким чином, що в діаметральному перерізі, який проходить через вісь симетрії супермаховика, його форма нагадує трикутник. Співвідношення основи до висоти трикутника розраховується за спеціальними формулами, які враховують габаритні показники супермаховика і міцнісні характеристики матеріалу намотки.

Цей супермаховик має наступні особливості:

- намотка ефективно гасить вібрації в ободі, підвищуючи його стабільність;

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- конструкція характеризується високою аеродинамічністю, що зменшує опір повітря при обертанні.

Проте є й недоліки: ненадійність обода, оскільки елементи намотки можуть зісковзувати при обертанні. Це обмежує застосування даної конструкції в умовах високих навантажень.

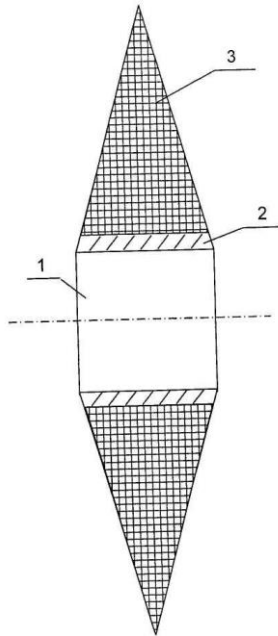


Рисунок 1.6 – Збалансований супермаховик трикутної форми

Супермаховик функціонує таким чином [10, 11].

Під час обертання, яке передається через маточину (1), в супермаховику накопичується кінетична енергія. Водночас відцентрові сили намагаються розірвати його. Максимальна концентрація напружень спостерігається в центральній частині супермаховика. У разі застосування запропонованої конусоподібної форми обода (3) відцентрові сили розподіляються за іншим законом, ніж у випадку традиційної циліндричної намотки.

Розрахунки показують, що при використанні конусоподібної намотки концентрація напружень на межі з диском (2) буде трохи вищою, ніж у традиційній конструкції, але питома енергія, накопичена супермаховиком, значно більша.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА24.00.00.000 ПЗ

Арк.

21

Порівняння з прототипом.

При масі маховика 3250 кг і кутовій швидкості 90 рад/с запропонований супермаховик накопичує  $1,2 \cdot 10^8$  Дж, тоді як прототип із циліндричним ободом накопичує лише  $0,7 \cdot 10^8$  Дж.

Гранична швидкість обертання для запропонованого маховика складає 90 рад/с, тоді як для прототипу - 110 рад/с. Тобто, в плані міцності циліндричний маховик виглядає краще.

Однак, враховуючи основну функцію маховиків — накопичення енергії, запропонована конструкція значно ефективніша. При кутовій швидкості 90 рад/с конусоподібний обід накопичує  $1,194 \cdot 10^8$  Дж, тоді як прототип навіть за більшої швидкості (110 рад/с) накопичує лише  $0,9975 \cdot 10^8$  Дж, що на 20% менше.

Це доводить, що запропонований супермаховик є більш енергоефективним, незважаючи на трохи нижчі показники міцності.

Використання конусоподібної намотки в конструкції супермаховика дозволяє суттєво збільшити максимально можливу питому енергію, що накопичується на одиницю маси, без зміни матеріалів намотки. Також така конструкція забезпечує більшу безпеку, оскільки в разі руйнування ободу елементи залишаються менш небезпечними. Це робить супермаховик більш енергомістким і безпечним для використання в технічних пристроях і системах.

Переваги:

- конусоподібна форма маховика збільшує питому енергію, що накопичується на одиницю маси;
- використання високоміцної стрічки для ободу забезпечує витримування великих навантажень навіть за високих швидкостей, завдяки амортизаційним властивостям ободу;

Недоліки:

- багатoeлементна конструкція маховика ускладнює його виготовлення та складання;

					MPMA24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- мала ширина у вершині конуса і невелика маса зменшують ефективність у розгоні валу преса;
- маховик змінного моменту інерції.

Маховик із змінним моментом інерції працює за рахунок переміщення поршнів-тягарів, що змінюють розподіл інерції. Рух поршнів відбувається під дією системної рідини, що подається з гідроциліндра, та пружин, які забезпечують зворотну дію.

На рисунку 1.7 (аркуш [МРМА24.00.00.000ДО2]) представлений маховик із регулюванням динамічного моменту інерції в положенні найменшого моменту інерції. Рисунок 1.8 (аркуш [МРМА24.00.00.000ДО2]) демонструє розріз А-А на рисунку 1.7, а рисунок 1.9 (аркуш [МРМА24.00.00.000ДО2]) показує маховик у положенні найбільшого моменту інерції. На рисунку 1.10 зображено розріз Б-Б на рисунку 1.9 (аркуш [МРМА24.00.00.000ДО2]).

Такий тип маховика забезпечує ефективне регулювання динамічного моменту інерції, зменшуючи інерційність системи та покращуючи загальну динаміку роботи [10, 11].

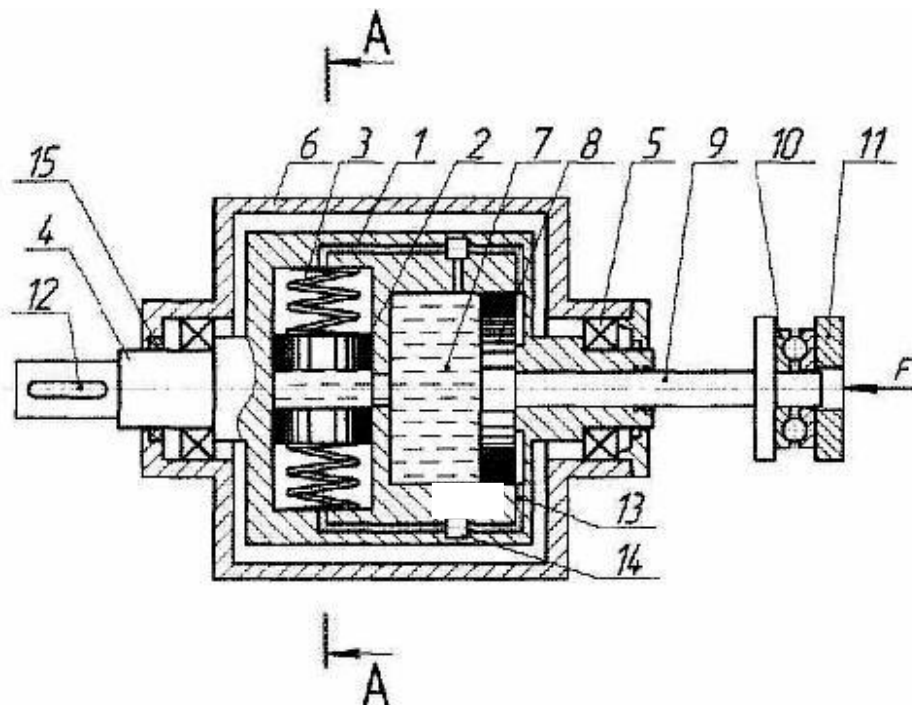


Рисунок 1.7 - Маховик з регулюванням динамічного моменту інерції, положення, коли динамічний момент інерції найменший

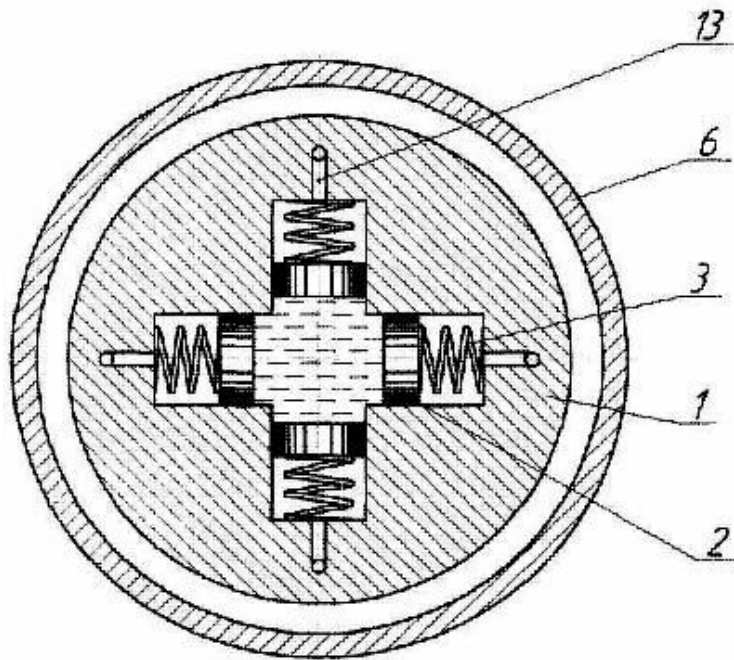


Рисунок 1.8 – Розріз А-А на рисунку 1.7

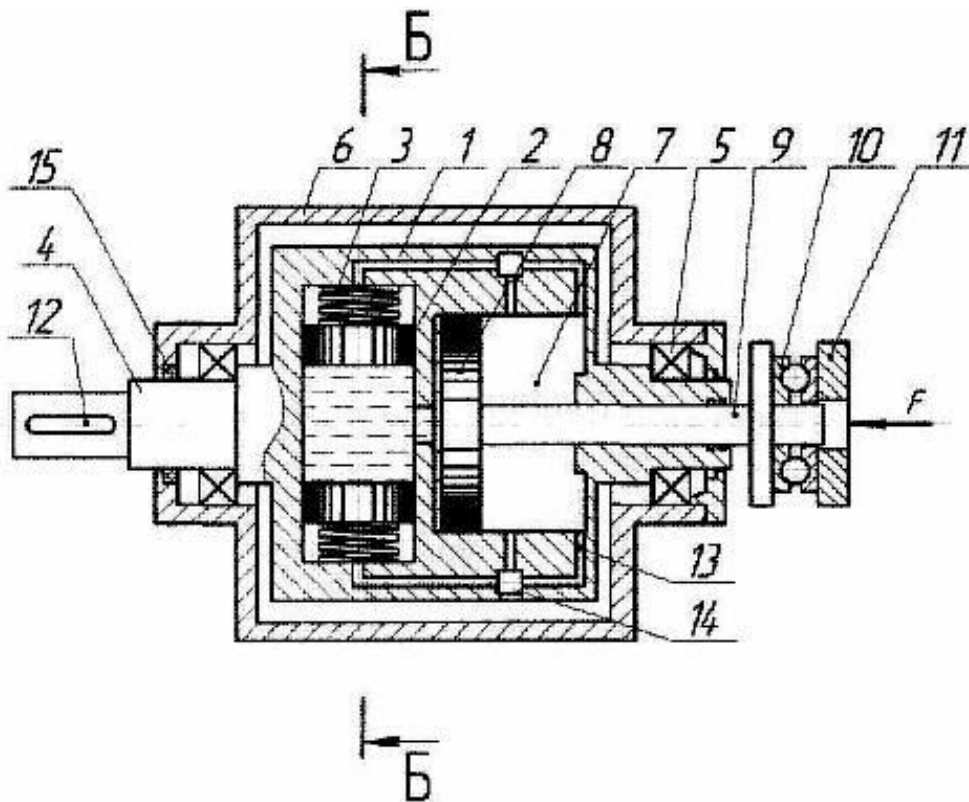


Рисунок 1.9 - Маховик з регулюванням динамічного моменту інерції, положення, коли динамічний момент інерції найбільший

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА24.00.00.000 ПЗ

Арк.  
24

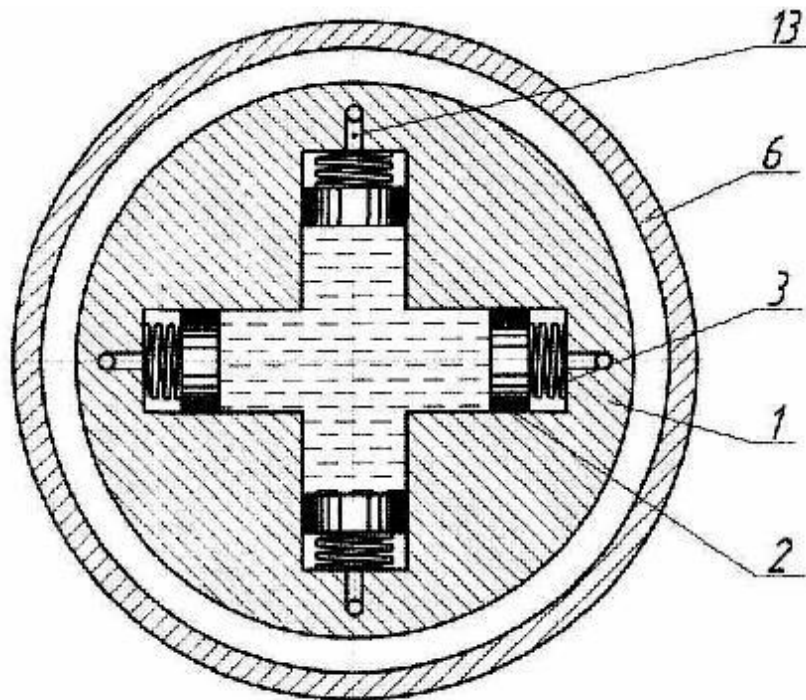


Рисунок 1.10 - Розріз Б-Б на рисунку 1.9

Маховик із регулюванням динамічного моменту інерції складається з основних компонентів: основа 1 має осесиметричні порожнини, у яких розташовані поршні-тягарі 2, здатні до радіального переміщення. З одного боку поршні-тягарі 2 підпружинені пружинами 3. Маховик 1 інтегрований із валом 4, який встановлено на опорах 5 у корпусі 6.

Стиснена рідина подається в порожнини під поршні-тягарі 2 за допомогою гідроциліндра 7 з поршнем 8. Поршень 8 з'єднаний через шток 9 та упорний підшипник 10 із натискним пристроєм 11. Передача руху від маховика 1 до інших механізмів здійснюється через шпонку 12, встановлену на вихідній ділянці вала 4. Рідина, яка просочується за поршні-тягарі 2 та поршень 8, виводиться через дренажні канали 13 і перепускні клапани 14 в рідинну порожнину гідроциліндра 7. Для герметизації опор 5 застосовуються ущільнення 15.

Принцип роботи маховика:

- стиснена рідина подається до активної зони порожнин маховика 1, створюючи тиск на поршні-тягарі 2;

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА24.00.00.000 ПЗ

Арк.  
25

- поршні-тягарі 2 переміщуються в радіальному напрямку, змінюючи момент інерції маховика.

- рідина, що витікає з активної зони, відводиться дренажними каналами 13 через перепускні клапани 14, повертаючись у рідинну порожнину гідроциліндра 7.

- зворотній рух поршнів забезпечується пружинами 3, які повертають поршні у вихідне положення при зниженні тиску.

Цей механізм дозволяє регулювати динамічний момент інерції маховика залежно від умов роботи, забезпечуючи оптимальні параметри функціонування системи.

Герметизація мастила опор 5 забезпечується за допомогою ущільнень 15, які забезпечують надійну ізоляцію мастила від зовнішнього середовища.

Переваги:

- зниження інерційності системи регулювання динамічного моменту інерції маховика завдяки прямій дії системної рідини на поршні;

- розширення можливостей автоматизації процесу регулювання динамічного моменту інерції;

Недоліки:

- складність конструкції маховика, що вимагає значних матеріальних ресурсів для виготовлення.

- низька надійність через необхідність додавання рідини до системи для підтримки її роботи.

- принцип дії маховика з регулюванням динамічного моменту інерції:

Регулювання моменту інерції забезпечується переміщенням поршнів-тягарів у радіальному напрямку. Переміщення здійснюється завдяки дії стисненого повітря з одного боку і пружин або стиснутої рідини — з іншого. Такий спосіб регулювання дозволяє збільшити діапазон регулювання динамічного моменту інерції та сприяє автоматизації керування.

Ілюстрації:

					MPMA24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						26
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- рисунок 1.11, схема регулювання моменту інерції маховика, положення з мінімальним моментом інерції;
- рисунок 1.12, розріз А-А, що деталізує конструкцію маховика в положенні мінімального моменту інерції;
- рисунок 1.13, схема регулювання моменту інерції маховика, положення з максимальним моментом інерції;
- рисунок 1.14, розріз Б-Б, що показує конструкцію маховика при максимальному моменті інерції.

Такий механізм забезпечує більш широкий діапазон налаштувань динамічного моменту інерції, дозволяючи адаптувати маховик до різних умов експлуатації та автоматизувати процес регулювання (аркуш [МРМА24.00.00.000ДО2]).

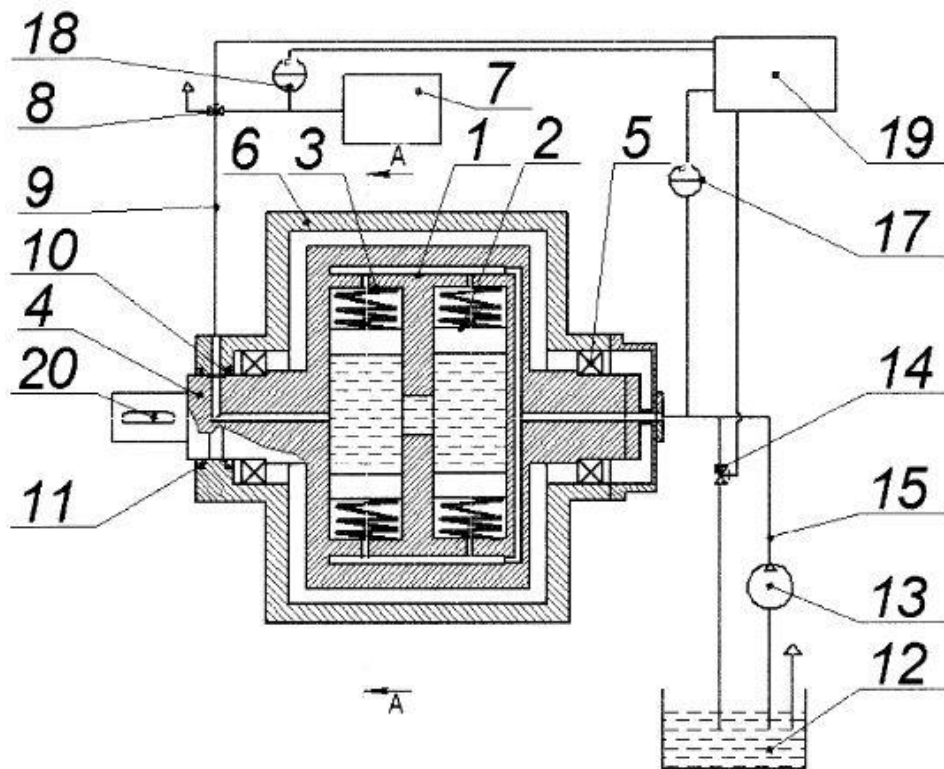


Рисунок 1.11 - Схема здійснення способу регулювання динамічного моменту інерції маховика, положення, коли динамічний момент інерції найменший

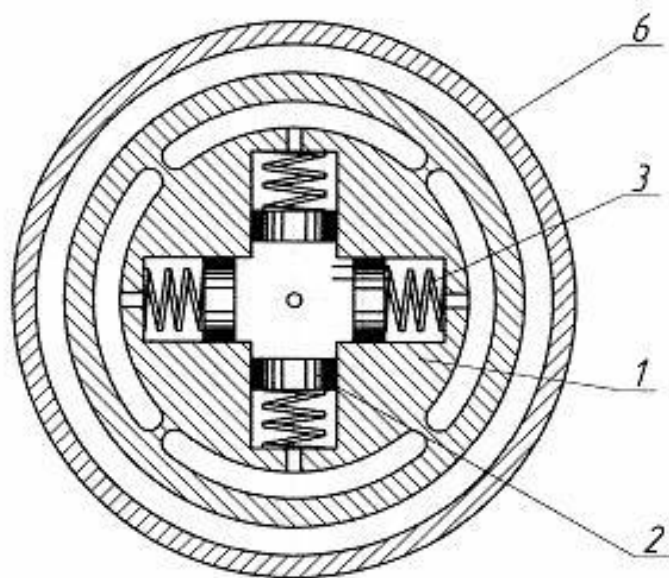


Рисунок 1.12 - Розріз А-А на рисунку 1.11

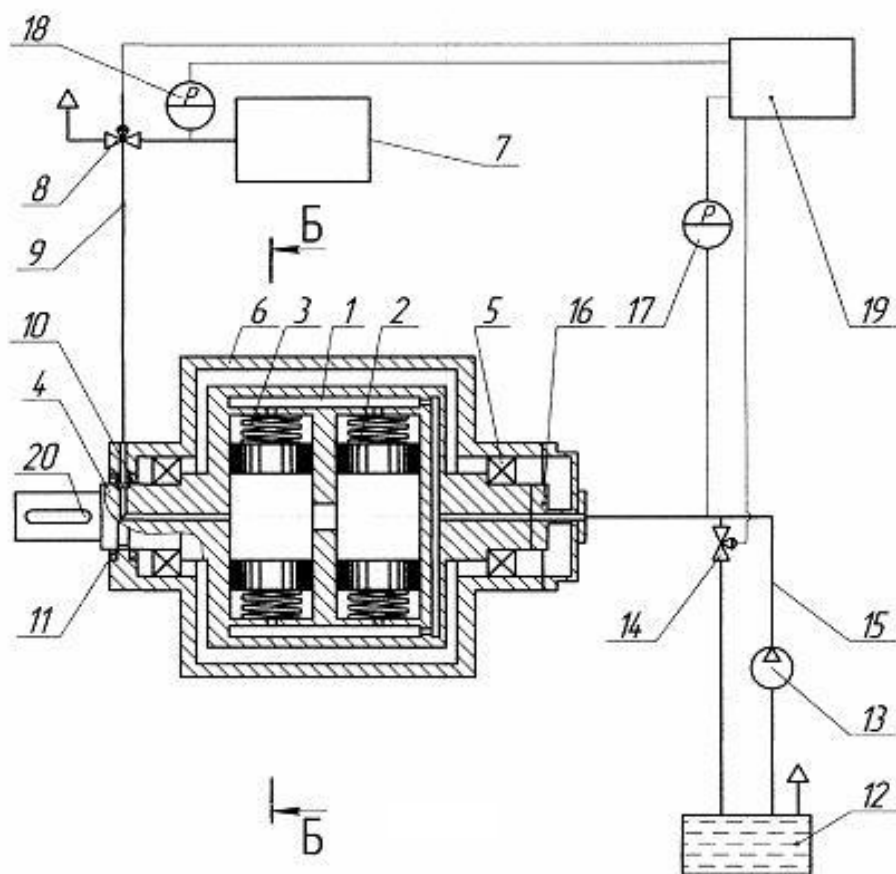


Рисунок 1.13 - Схема здійснення способу регулювання динамічного моменту інерції маховика, положення, коли динамічний момент інерції найбільший

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА24.00.00.000 ПЗ

Арк.  
28



- коли поршні-тягарі 2 розташовані на периферії, динамічний момент інерції маховика 1 є максимальним.

Керування.

Процес управління динамічним моментом інерції маховика 1 здійснюється через регулювальні клапани 8 і 14 та імпульсні датчики тиску 17 і 18, які передають інформацію до бортового комп'ютера 19. Це дозволяє забезпечити точне і автоматизоване регулювання параметрів системи.

Такий метод регулювання динамічного моменту інерції маховика збільшує інерційність системи, розширює діапазон регулювання цього параметра та дозволяє впроваджувати автоматизоване керування.

Переваги:

- збільшується інерційність системи та розширюється діапазон регулювання динамічного моменту інерції;
- з'являється можливість впровадження автоматизованого керування.

Недоліки:

- складна конструкція, що вимагає значних витрат матеріалів;
- необхідність підключення додаткових пристроїв для подачі стисненого повітря в поршні маховика;
- низька довговічність механізму;
- збалансований супермаховик.

Цей супермаховик складається з маточини 1 і диска 2, який має радіальні вирізи 3, а також обода 4, виконаного у вигляді намотки з високоміцної стрічки або волочильного дроту. Між маточиною 1 і ободом 4 на диску встановлений кільцевий гофр 5 для покращення балансу.

На рисунку 1.15 (аркуш [МРМА24.00.00.000ДО1]) представлено збалансований супермаховик, а на рисунку 1.16 продемонстровано його радіальні вирізи.

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

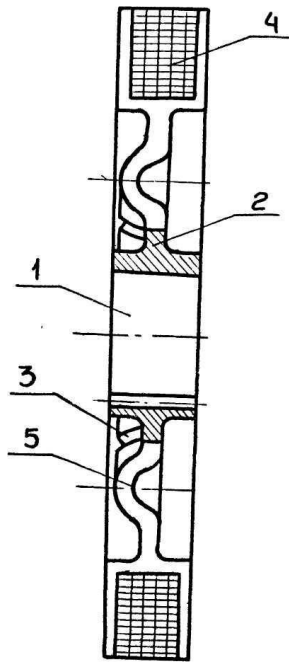


Рисунок 1.15 – Збалансований супермаховик

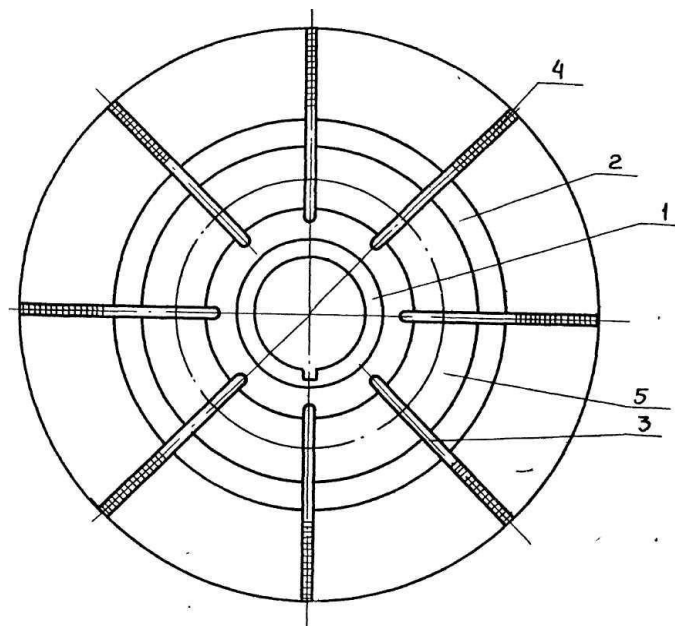


Рисунок 1.16 – Радіальні вирізи супермаховика

Принцип роботи та переваги супермаховика.

Супермаховик працює за наступним принципом: під час обертання відцентрові сили деформують кільцеву гофру 5, розташовану на диску 2, до межі текучості. Це забезпечує балансування супермаховика та еластичну передачу навантаження у вигляді інерційного моменту з обода 4 на маточину 1. У порівнянні

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА24.00.00.000 ПЗ

Арк.  
31

з аналогами, запропонована конструкція є більш надійною та забезпечує підвищену несучу здатність.

Переваги:

- виконання обода маховика з високоміцної стрічки дозволяє витримувати більші навантаження за високих швидкостей завдяки амортизації;
- спеціальна форма маховика сприяє збільшенню питомої енергії та покращує розгін вала, на якому він встановлений;
- кільцева гофра в порожнині маточини забезпечує балансування маховика та зменшує навантаження на його конструкцію.

Недоліки:

- намотування високоміцної стрічки потребує високої точності, щоб уникнути появи вібрацій.

Маховик – гібридний привід Alternator.

Використання маховиків з метою збереження енергії в автомобільній галузі обмежувалося великими габаритами та масою. Рішенням цієї проблеми стало створення маховиків, здатних обертатися з дуже високою швидкістю (десятки тисяч обертів на хвилину). Такий підхід дозволяє суттєво зменшити їхні розміри та масу.

На рисунку 1.17 зображено гібридний привід типу Alternator [13, 14].

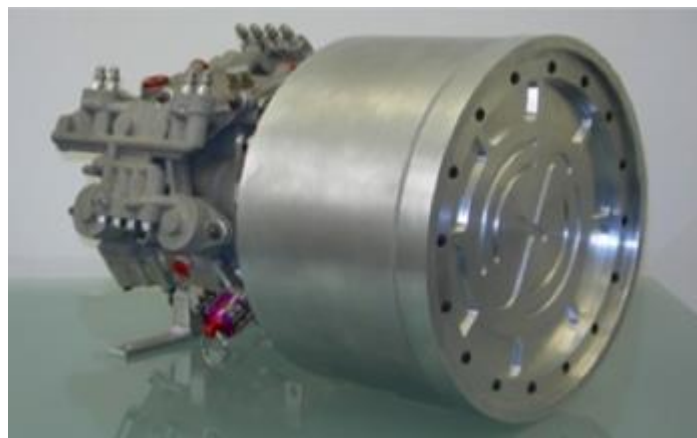


Рисунок 1.17 - Гібридний привід (alternator)

Використання високошвидкісних маховиків у гібридних автомобілях є перспективним напрямком розвитку транспортних технологій. Основною перевагою маховика є те, що механічна енергія не потребує перетворення в інші форми, що дозволяє уникнути енергетичних втрат, які виникають під час таких перетворень. Проте, маховики мають недолік – вони швидко втрачають енергію через тертя, що перешкоджає їх обертанню. Водночас, у режимах руху з частими прискореннями та зупинками, характерними для гібридних автомобілів, втрати від тертя менш значні, оскільки енергія, накопичена під час гальмування, швидко використовується при розгоні.

Одним із найвідоміших проектів з впровадження гібридного приводу на основі маховика є система KERS (система рекуперації кінетичної енергії), розроблена спільно компаніями Flybrid Systems, Torotrak і Xtrac. Планувалося, що з набранням чинності нових регламентів Формули-1 у 2009 році система KERS знайде широке застосування в найвідоміших гоночних автомобілях. Робота над впровадженням системи велася разом із однією з провідних команд Формули-1 [13, 14].

Гібридна система KERS побудована на основі високошвидкісного маховика, виготовленого зі сталі та вуглецевого волокна. Маховик обертається зі швидкістю 60 000 об/хв у вакуумній камері для мінімізації тертя. З'єднання маховика з трансмісією здійснюється через кілька зубчастих передач із фіксованим передавальним числом, зчеплення і варіатор [15].

Система KERS при масі всього 24 кг здатна забезпечити передачу потужності до 60 кВт в обох напрямках та акумулювати до 600 кДж енергії з урахуванням втрат. Особливістю системи є унікальна герметизація вакуумної камери. Вал маховика змонтовано за допомогою спеціальних ущільнень, які розробники з Flybrid пропонують продавати окремо. Система KERS може бути використана не лише у Формулі-1, але й у спортивних автомобілях, звичайних легкових автомобілях, а також у потягах [15].

Переваги системи:

					MPMA24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						33
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- завдяки високій швидкості обертання маховика (десятки тисяч обертів на хвилину), його розміри значно зменшуються, що дозволяє використовувати систему навіть у транспортних засобах з обмеженим простором.

Недоліки:

- висока вартість виготовлення маховика та його складна конструкція.
- обмежена довговічність у порівнянні з традиційними системами.

Маховик із магнітною обгінною муфтою, який є частиною системи KERS Ricardo Kinergy, показаний на рисунку 1.18 [16].

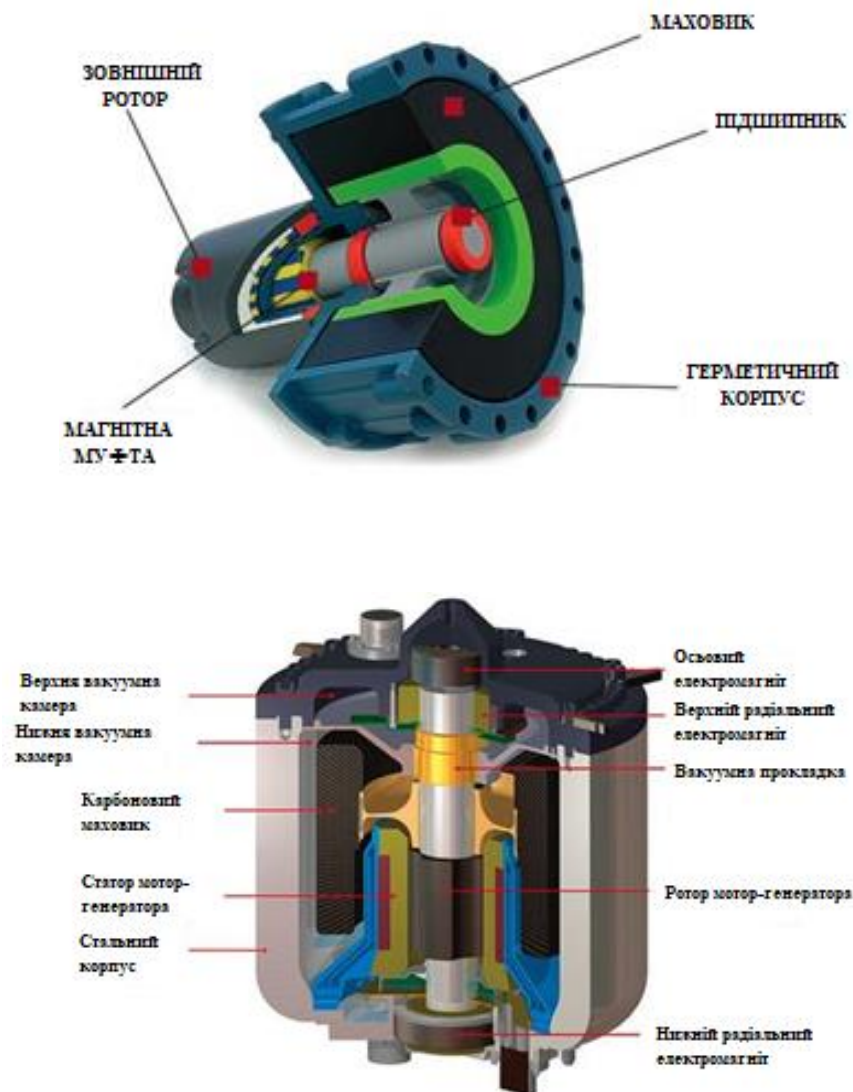


Рисунок 1.18 - Kers ricardo kinergy з безконтактною магнітною муфтою

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

MPMA24.00.00.000 ПЗ

Арк.  
34

У його конструкцію інтегровано магнітний неодимовий порошок та постійні магніти, закріплені епоксидною смолою. Обертання маховика викликає протилежний за напрямком рух зовнішнього ротора магнітної муфти, який з'єднаний із тороїдальним варіатором Torotrak з передавальним числом від 10:1 до 1:1. Для забезпечення максимальної ефективності безконтактного з'єднання корпус маховика виготовлено з надзвичайно тонкими стінками. Зазор між двома елементами муфти становить лише 2 мм.

За даними розробників, коефіцієнт корисної дії магнітної передачі становить надзвичайно високий рівень - 99,9%.

### 1.3 Висновки до першого розділу

У першому розділі було проведено аналіз існуючих конструкцій маховиків та пристроїв для накопичення кінетичної енергії, які використовуються в легкій промисловості. На основі огляду було виявлено наступне.

1. Сучасні конструкції маховиків мають як переваги, так і суттєві недоліки. Наприклад, система KERS демонструє високий ККД (99,9%) та можливість ефективного регулювання моменту інерції, однак її складна конструкція та висока вартість обмежують використання в промислових умовах.

2. Маховики з регульованим моментом інерції забезпечують широкий діапазон регулювання динамічних характеристик, що дозволяє адаптувати їх до різних умов роботи. Однак вони мають низьку довговічність, потребують використання складних пневмо- та гідросистем.

3. Збалансований супермаховик, обід якого виготовлений із намотаного високоміцного дроту, було визнано оптимальним варіантом для використання в пресовому обладнанні. Його переваги включають:

- підвищену міцність та здатність гасити навантаження на обід;
- можливість збереження цілісності маховика при розриві.

4. Було також встановлено, що сучасні розробки маховиків здебільшого орієнтовані на автомобільну промисловість, тоді як у легкій промисловості їх використання обмежене.

На основі проведеного аналізу для удосконалення пресового обладнання було обрано збалансований супермаховик із намотаним ободом. Це рішення забезпечує оптимальне співвідношення надійності, енергетичної ефективності та можливостей впровадження у виробничі процеси.

					MPMA24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## 2 РОЗРОБКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО НАКОПИЧУВАЧА ДЛЯ ПРЕСОВОГО ОБЛАДНАННЯ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

### 2.1 Розробка конструкції махового колеса для підвищення ефективності преса ПВГ-8-2

Проаналізувавши існуючі пристрої для накопичення кінетичної енергії, для розробки конструкції махового колеса було обрано збалансований супермаховик з кільцевим гофром. Це рішення пояснюється такими перевагами даної конструкції: висока надійність, простота у виготовленні та ремонті, економічність, збільшена довговічність привода преса завдяки амортизаційним властивостям кільцевого гофра [11, 12].

Супермаховик складається з двох напівмуфт. Напівмуфта 4 оснащена маточиною 2, до якої кріпиться вал насоса за допомогою шпонки. Диск 1 має радіальні вирізи 7, кільцеву гофру 14 та обід 6, намотаний зі сталюого дроту. Напівмуфта 5 оснащена маточиною 3, до якої кріпиться вал двигуна. Обидві напівмуфти (4 і 5) закріплюються за допомогою пальців 12, шайб 13, та затиснутих гайок 10. Для зменшення ударних навантажень між напівмуфтами встановлено гумове кільце 11. Прокладки 8 і 9 забезпечують додаткову амортизацію.

На рисунку 2.1 (аркуш [МРМА24.01.00.000СК] показано збалансований супермаховик. На рисунку 2.2 показано деталі радіальних вирізів супермаховика. Ця конструкція забезпечує високий рівень ефективності та надійності при одночасному зменшенні витрат на виготовлення та обслуговування.

Супермаховик функціонує наступним чином [11, 12].

Під час розгону супермаховик набирає обертів, збільшуючи швидкість обертання вала двигуна понад його номінальну швидкість (зростає момент інерції). Це значно покращує процес вирубування та сприяє економії електроенергії. У процесі обертання відцентрові сили викликають деформацію кільцевої гофри

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк. 37
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

14 та радіальних вирізів 7 диска 1, що забезпечує збалансування супермаховика та еластичну передачу інерційного моменту від обода 6 до маточини 2.

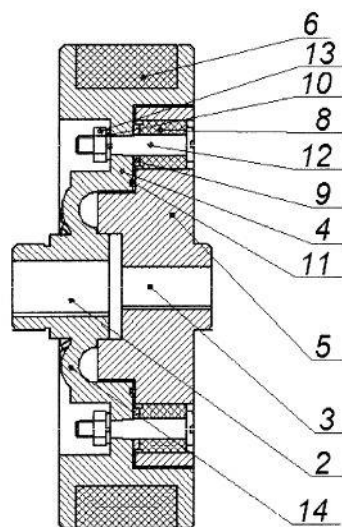


Рисунок 2.1 – Збалансований супермаховик

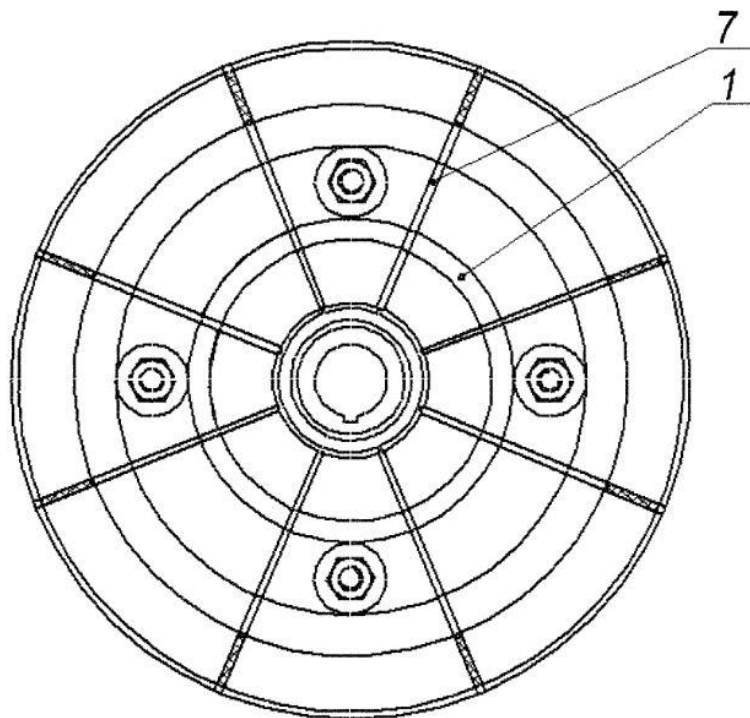


Рисунок 2.2 – Радіальні вирізи супермаховика

Крім того, під час роботи маховика знижується навантаження на вал двигуна та зменшується інтенсивність зношування шпонкового з'єднання вала двигуна, а також навантажених ділянок муфти 5 з маточиною 3 [11, 12]. Це досягається за рахунок деформації гумового кільця 11, розташованого між муфтами, та

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА24.00.00.000 ПЗ

Арк.  
38

деформації прокладок 8, які забезпечують гнучкість муфти 4 відносно муфти 5. Така конструкція запобігає тертю між муфтами та сприяє довговічності всієї системи.

Порівняно з прототипом запропонована конструкція супермаховика є більш надійною та забезпечує підвищену міцність махового колеса.

Переваги [11, 12]:

- виконання обода маховика з намотки сталюого дроту дозволяє витримувати значні навантаження на високих швидкостях завдяки амортизаційним властивостям обода;

- форма маховика сприяє підвищенню питомої енергії та забезпечує ефективний розгін вала, на якому він встановлений;

- кільцева гофра в порожнині маточини виконує функцію балансування та гасить навантаження на маховик, підвищуючи його стабільність;

- у разі руйнування махового колеса обід із намотаного сталюого дроту запобігає розльоту маховика на окремі частини, що знижує ризик пошкодження вирубного преса.

Недоліки [11, 12]:

- намотка сталюого дроту потребує високої точності, рівномірності та щільності, а також надійного закріплення кінців дроту, щоб уникнути його розриву чи дисбалансу конструкції.

Запропоноване махове колесо повністю відповідає вимогам та параметрам роботи обраного преса.

## 2.2 Розробка електричних схем регулювання швидкості та тиску для виробничих механізмів

Статичною системою автоматизованого регулювання називають таку систему, у якій неможливо забезпечити однакове значення регульованого параметра у всіх сталих режимах при незмінних налаштуваннях системи [17, 18].

					MPMA24.00.00.000 ПЗ	Арк. 39
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

У статичному регулюванні величина регулюючого впливу безпосередньо залежить від відхилення регульованого параметра від заданого значення. Це означає, що для формування необхідного регулюючого впливу необхідне певне відхилення регульованого параметра. Рівновага системи для різних навантажень досягається при різних значеннях регульованого параметра, які знаходяться в заздалегідь визначених межах.

Схема автоматичного регулювання кутової швидкості валу двигуна/

На рис. 2.3 представлено схему автоматичного регулювання кутової швидкості валу двигуна [19-22]. Двигун 4 є об'єктом регулювання. Зміна навантаження на валу електродвигуна виступає як обурювальний вплив. Ця схема є схемою непрямої дії, яка реагує на зміни обурювального впливу.

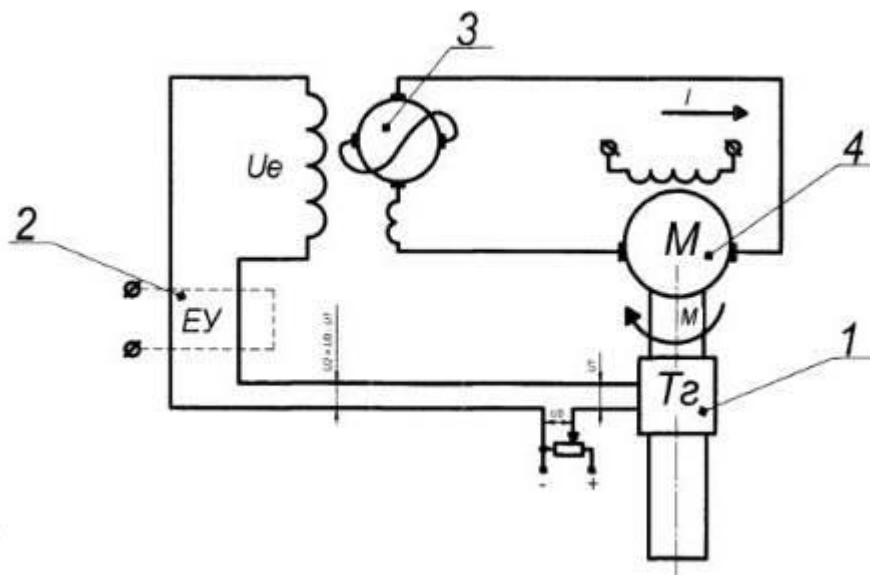


Рисунок 2.3 – Схема автоматичного контролю кутової швидкості електродвигуна

Схема керування працює наступним чином [23].

Вимірювальним пристроєм є тахогенератор (1), який генерує напругу  $U_1$ , пропорційну регульованій величині - кутовій швидкості. На потенціометрі задається напруга  $U_0$ , яка відповідає необхідному значенню кутової швидкості. Різниця між  $U_0$  і  $U_1$ , тобто  $U_2 = U_0 - U_1$ , подається на вхід електромашинного під-

силювача (3). У деяких випадках використовується попередній електричний підсилювач.

Електромашинний підсилювач (3), відповідно до сигналу збудження  $U_z$ , змінює струм у колі якоря електродвигуна, забезпечуючи регулюючий вплив, який усуває наявне відхилення кутової швидкості.

У статичній системі наявність відхилення є неминучою. Чим більшим є вплив зовнішнього збурення, тим більше має бути відхилення. При статичному регулюванні регулюючий вплив однозначно визначається величиною відхилення регульованого параметра від заданого значення. У результаті рівновага системи для різних навантажень досягається при різних значеннях регульованого параметра, що знаходяться в межах заздалегідь встановлених значень.

Схема автоматичного контролю тиску мастила в системі [24].

На рис. 2.4 зображена схема автоматичного контролю тиску мастила в системі.

Схема забезпечує автоматизований контроль і регулювання тиску мастила. Вона постійно відображає робочий тиск у системі, автоматично коригує його, порівнюючи дійсне значення із заданим, і в разі необхідності підвищує тиск для забезпечення ефективного вирубування матеріалу.

Компоненти схеми включають важіль, який забезпечує механічне передавання переміщень, що відображають зміни тиску в системі; диференційний трансформаторний перетворювач, що перетворює механічні переміщення важеля у змінний електричний сигнал; підсилювач, який підсилює сигнал від перетворювача для подальшої обробки; перетворювач змінного струму на постійний для перетворення сигналу у постійний струм; лінійний магнітоелектричний перетворювач, який перетворює постійний струм у механічну дію для регулювання сильфона; міліамперметр магнітоелектричної системи для відображення різниці між заданим і дійсним тиском; регульовальний сильфон для механічного коригування подачі мастила; лопатевий насос, що забезпечує подачу мастила під тиском і

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		



- якщо тиск у системі перевищує норму, струм надходить на лінійний магнітоелектричний перетворювач 5. Він через важіль 1 притискає контакт сільфона 7, знижуючи тиск у системі до потрібного рівня.

В межах регулювання струм змінюється від 0 до 20 мА залежно від відхилення тиску. Ця схема забезпечує автоматичне підтримання тиску мастила у встановлених межах, забезпечуючи стабільну роботу системи.

### 2.3 Висновки до другого розділу

У цьому розділі проведено комплексний аналіз і розробку рішень для підвищення енергоефективності пресового обладнання легкої промисловості. Основною метою стало створення накопичувача кінетичної енергії у вигляді махового колеса, що дозволяє зменшити енергоспоживання, знизити динамічні навантаження на двигун та підвищити його довговічність. Розробка конструкції махового колеса виконана з урахуванням специфічних особливостей преса ПВГ-8-2.

Також були запропоновані та обґрунтовані електричні схеми регулювання швидкості обертання вала двигуна і тиску в системі, що забезпечують стабільність роботи обладнання та оптимізацію енергоспоживання. Запропоновані технічні рішення сприяють зниженню експлуатаційних витрат, покращенню надійності пресового обладнання та його відповідності сучасним вимогам енергоефективності та продуктивності.

## 3 РОЗРАХУНОК МАХОВОГО КОЛЕСА ДЛЯ ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНОГО ПРЕСУ ПВГ-8-2-О

### 3.1 Інженерний розрахунок посадки махового колеса з натягом

Пара з'єднання з натягом вал-напівмуфта належить до найбільш розширених типів тертя, які потребують остаточного розрахунку для забезпечення надійності з'єднання та визначення необхідного зусилля запресування [25, 26].

На рисунку 3.1 представлена розрахункова схема такого з'єднання, яка демонструє взаємодію між валом та напівмуфтою, враховуючи натяг, що забезпечує необхідне тертя для передачі моменту або зусиль.

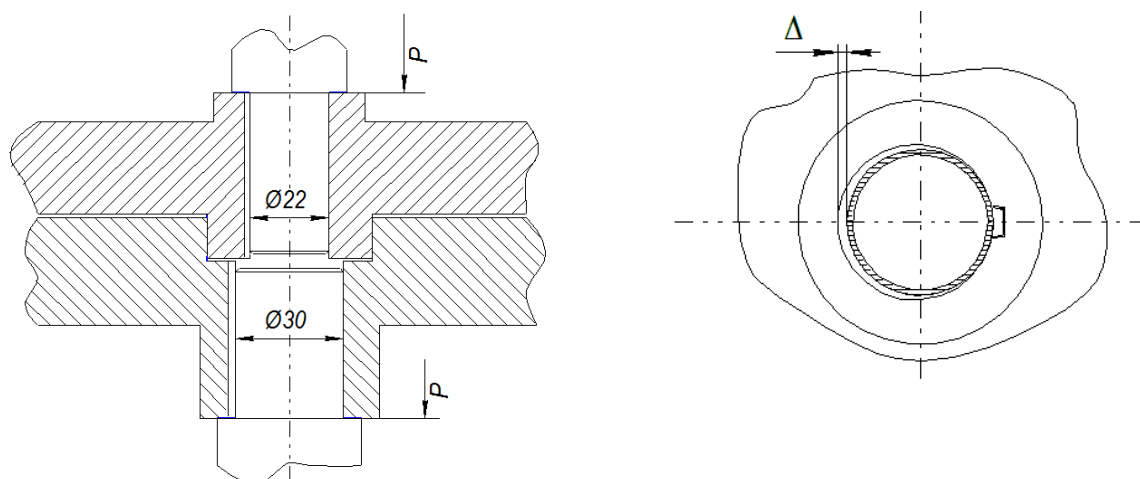


Рисунок 3.1 – Розрахункова схема пари “вал – напівмуфта”

#### 3.1.1 Розрахунок ділянки діаметром $D = 22$ мм [25, 26]

Вихідні дані:

- матеріал валу – сталь 45;
- номінальний розмір з'єднання  $d_{нз} = 22$  мм;
- крутний момент на валу  $M_{кр} = 25$  Н\*м;
- довжина з'єднання  $l_3 = 42$  мм;

- матеріал напівмуфти – сталь 20;
- діаметр муфти  $d = 280$  мм;
- коефіцієнт тертя в з'єднанні  $f_3 = 0,08$ .

Порядок розрахунку наступний.

1. Розрахунок робочого зусилля на валу:

$$p_p = \frac{M_{кр}}{d_{нз}/2}; \quad (3.1)$$

$$p_p = \frac{25}{0,022/2} = 2272,72 \text{ Н.}$$

2. Розрахунок зусилля напрусування напівмуфти на вал:

$$p_3 = p_p \cdot k_3; \quad (3.2)$$

де  $k_3$  – коефіцієнт запасу,

$$p_3 = 2272,72 \cdot 1,6 = 3636,36 \text{ Н.}$$

3. Розрахунок питомого тиску між напівмуфтою і валом при напруванні шківів:

$$p = \frac{p_3}{\pi \cdot d_{нз} \cdot l_3 \cdot f_3}; \quad (3.3)$$

$$p = \frac{3636,36}{3,14 \cdot 0,022 \cdot 0,042 \cdot 0,08} = 156 \cdot 10^5 \text{ Па} = 15,6 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}.$$

4. Знаходження мінімального натягу посадки:

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		45

$$\delta_{n.min} = p \cdot d_{нз} \cdot \left( \frac{C_1 - \mu_1}{E_1} + \frac{C_2 - \mu_2}{E_2} \right); \quad (3.4)$$

Враховуючи, що  $d_2 = \infty$  (діаметр охоплюючої деталі), а  $d_1 = 0$  (внутрішній діаметр деталі, що охоплена) знаходимо коефіцієнти  $C_1$  і  $C_2$  із формул:

$$C_1 = \frac{1 + \left(\frac{d_1}{d_{нз}}\right)^2}{1 - \left(\frac{d_1}{d_{нз}}\right)^2}; \quad C_2 = \frac{1 + \left(\frac{d_{нз}}{d_2}\right)^2}{1 - \left(\frac{d_{нз}}{d_2}\right)^2}, \quad (3.5)$$

де  $d_1$  і  $d_2$  - внутрішній діаметр охоплюючої і зовнішній діаметр деталі, що охоплена.

Відповідно було отмано:

$$C_1 = \frac{1 + \left(\frac{0}{22}\right)^2}{1 - \left(\frac{0}{22}\right)^2} = 1; \quad C_2 = \frac{1 + \left(\frac{22}{\infty}\right)^2}{1 - \left(\frac{22}{\infty}\right)^2} = 1.$$

Виходячи з цього мінімальний натяг посадки складає:

$$\delta_{n.min} = 15,6 \cdot 22 \cdot \left( \frac{1 - 0,28}{2,1 \cdot 10^5} + \frac{1 - 0,28}{2,1 \cdot 10^5} \right) = 2,352 \cdot 10^{-3} \text{ мм} = 2,35 \text{ мкм.}$$

5. За розрахованим мінімальним натягом було обрано найближчу посадку 22 Н7/р6 ( $N_{max} = 42$  мкм;  $N_{min} = 1$  мкм).

### 3.1.2 Розрахунок ділянки діаметром $D = 30$ мм [25, 26]

Вихідні дані:

- матеріал валу – сталь 45;
- номінальний розмір з'єднання  $d_{нз} = 30$  мм;
- крутний момент на валу  $M_{кр} = 25$  Н\*м;

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк. 46
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

- довжина з'єднання  $l_3 = 45$  мм;
- матеріал напівмуфти – сталь 20;
- діаметр муфти  $d = 280$  мм;
- коефіцієнт тертя в з'єднанні  $f_3 = 0,08$ .

Порядок розрахунку наступний.

1. Розрахунок робочого зусилля на валу згідно (3.1):

$$p_p = \frac{25}{0,03/2} = 1666,66 \text{ Н.}$$

2. Розрахунок зусилля напрусування напівмуфти на вал згідно (3.2):

$$p_3 = 1666,66 \cdot 1,6 = 2666,66 \text{ Н.}$$

3. Розрахунок питомого тиску між напівмуфтою і валом при напруванні шківів згідно (3.3):

$$p = \frac{2666,66}{3,14 \cdot 0,03 \cdot 0,045 \cdot 0,08} = 78,634 \cdot 10^5 \text{ Па} = 7,863 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}.$$

4. Знаходження коефіцієнтів  $C_1$  і  $C_2$  згідно (3.5):

$$C_1 = \frac{1 + \left(\frac{0}{30}\right)^2}{1 - \left(\frac{0}{30}\right)^2} = 1; \quad C_2 = \frac{1 + \left(\frac{30}{\infty}\right)^2}{1 - \left(\frac{30}{\infty}\right)^2} = 1.$$

5. Знаходження мінімального натягу посадки згідно (3.4):

$$\delta_{n.min} = 7,863 \cdot 30 \cdot \left( \frac{1 - 0,28}{2,1 \cdot 10^5} + \frac{1 - 0,28}{2,1 \cdot 10^5} \right) = 1,617 \cdot 10^{-3} \text{ мм} = 1,617 \text{ мкм.}$$

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк. 47
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

6. За розрахованим мінімальним натягом було вибрано найближчу посадку 30 Н7/р6 ( $N_{\max} = 42$  мкм;  $N_{\min} = 1$  мкм).

### 3.2 Розрахунок і підбір електродвигуна для системи накопичення кінетичної енергії

1. Робота, яка виконується за повний цикл визначається із формули [27, 28]:

$$A_{\text{ц}} = R_0 \cdot (2\pi), \quad (3.6)$$

де  $R_0$  – радіус робочої половини окружності махового колеса,

$$A_{\text{ц}} = 0,14 \cdot (2 \cdot 3,14) = 0,879 \text{ Дж.}$$

2. Розрахункова потужність електродвигуна складає:

$$p = \frac{|A_{\text{ц}}| \cdot n}{60 \cdot \mu_n}, \quad (3.7)$$

де  $n$  – потрібна частота обертання на валу електродвигуна,  $n = 1500$  хв<sup>-1</sup> = 25 с<sup>-1</sup>;

$\mu_n$  – коефіцієнт корисної дії,  $\mu_n = 0,94 - 0,98$ , прийнято  $\mu_n = 0,94$ ,

$$p = \frac{0,879 \cdot 25}{60 \cdot 0,94} = 0,389 \text{ Вт.}$$

3. Установча потужність електричного двигуна визначається за формулою:

$$P_y = K_y \cdot P, \quad (3.8)$$

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						48
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

де  $K_y$  – коефіцієнт запасу встановленої потужності,  $K_y = 1,2$ .

Тоді:

$$P_y = 1,2 \cdot 0,389 = 0,4668 \text{ Вт.}$$

Відповідно до ГОСТ 19523-74 було обрано трифазний асинхронний електродвигун єдиної серії 4А80А4У3 із короткозамкненим ротором [29].

Характеристики вибраного електричного двигуна:

- номінальна потужність  $P_n = 1,1 \text{ кВт} = 1100 \text{ Вт}$ ,
- коефіцієнт пускового моменту  $K_n = 2,0$ ,
- частота обертання  $n_e = 1500 \text{ хв}^{-1}$ ,
- маховий момент  $T_m = 0,013 \text{ Н} \cdot \text{М}^2$ .

4. Номінальна частота обертання електричного двигуна визначається за формулою:

$$n_{нд} = n_{снд} \cdot (1 - S_n). \quad (3.9)$$

Тоді:

$$n_{нд} = 1500 \cdot (1 - 0,053) = 1420 \text{ хв}^{-1} = 23,66 \text{ с}^{-1}.$$

5. Номінальна кутова швидкість ротора електродвигуна визначається наступним виразом:

$$\omega_{нд} = \pi \cdot n_{нд} / 30. \quad (3.10)$$

Тоді:

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$\omega_{\text{нд}} = 3,14 \cdot \frac{23,66}{30} = 2,476 \text{ с}^{-1}.$$

Таким чином, потужність трифазного асинхронного електродвигуна, який використовується у вирубному пресі ПВГ-8-2, стає  $P = 1,1$  кВт. Виходячи з розрахунків, можна зробити висновок, що для перекидання махового колеса достатній показник ефективності електродвигуна із потужністю  $P = 1$  кВт..

### 3.3 Розрахунок розмірів і конструктивних особливостей махового колеса

1. Площа впадини обода махового колеса визначається із виразу [30, 31]:

$$S_{\text{ВП}} = l \cdot h, \quad (3.11)$$

де  $l$  – довжина впадини обода маховика;

$h$  – висота впадини обода маховика.

Підставивши значення було отримано:

$$S_{\text{ВП}} = 0,058 \cdot 0,025 = 0,00145 \text{ м}^2.$$

2. Площа перерізу дроту визначається із виразу:

$$S_{\text{д}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4}, \quad (3.12)$$

де  $D$  – діаметр перерізу дроту.

Підставивши значення було отримано:

$$S_{\text{д}} = \frac{3,14 \cdot 0,002^2}{4} = 0,00000314 \text{ м}^2.$$

					MPMA24.00.00.000 ПЗ	Арк. 50
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

3. Потрібна довжина дроту знаходиться наступним чином:

$$L = \frac{S_{\text{ВП}}}{S_{\text{Д}}} \cdot d_c, \quad (3.13)$$

$$L = \frac{0,00145}{0,00000314} \cdot 0,25 = 115,445 \text{ м.}$$

4. Об'єм маховика визначається із виразу:

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L, \quad (3.14)$$

де  $D$  - діаметр маховика зовнішній.

Об'єм верхньої напівмуфти визначається із формули:

$$V_1 = \frac{3,14 \cdot 0,205^2}{4} \cdot 0,034 + \frac{3,14 \cdot 0,050^2}{4} \cdot 0,012 + \frac{3,14 \cdot 0,105^2}{4} \cdot 0,02 - \frac{3,14 \cdot 0,06^2}{4} \cdot 0,014 -$$

$$- \frac{3,14 \cdot 0,022^2}{4} \cdot 0,052 - \left( \frac{3,14 \cdot 0,028^2}{4} \cdot 0,034 \right) \cdot 4 = 0,00117 \text{ м}^3.$$

Об'єм напівмуфти нижньої знаходиться із виразу:

$$V_2 = \frac{3,14 \cdot 0,28^2}{4} \cdot 0,078 + \frac{3,14 \cdot 0,06^2}{4} \cdot 0,01 + \frac{3,14 \cdot 0,06^2}{4} \cdot 0,012 + \frac{3,14 \cdot 0,05^2}{4} \cdot 0,023 -$$

$$- \frac{3,14 \cdot 0,21^2}{4} \cdot 0,035 - \frac{3,14 \cdot 0,03^2}{4} \cdot 0,06 - \frac{3,14 \cdot 0,108^2}{4} \cdot 0,01 - \frac{3,14 \cdot 0,025^2}{4} \cdot 0,01 -$$

$$- \frac{3,14 \cdot 0,035^2}{4} \cdot 0,07 - \left( \frac{3,14 \cdot 0,03^2}{4} \cdot 0,03 \right) \cdot 4 - \left( \frac{3,14 \cdot 0,012^2}{4} \cdot 0,015 \right) \cdot 4 = 0,0034065 \text{ м}^3.$$

5. Сумарний об'єм визначається виразом:

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк. 51
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$V_{\text{сум}} = V_1 + V_2, \quad (3.15)$$

$$V_{\text{сум}} = 0,00117 + 0,0034065 = 0,004576 \text{ м}^3.$$

6. Маса маховика знаходиться із виразу:

$$m = \rho \cdot V, \quad (3.16)$$

де  $\rho$  - густина,  $\rho = 7,8 \cdot 10^3$ ; кг/м<sup>3</sup>.

Маса верхньої напівмуфти складає:

$$m_1 = 7,8 \cdot 10^3 \cdot 0,00117 = 9,126 \text{ кг.}$$

Маса нижньої напівмуфти буде рівною:

$$m_2 = 7,8 \cdot 10^3 \cdot 0,0034065 = 26,57 \text{ кг.}$$

7. Сумарна маса визначається із виразу:

$$m_{\text{сум}} = m_1 + m_2, \quad (3.17)$$

$$m_{\text{сум}} = 9,126 + 26,57 = 35,69 \text{ кг.}$$

8. Момент інерції маховика знаходиться із формули:

$$J = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (R^2 - r^2), \quad (3.18)$$

де  $m$  – маса маховика;

$r$  – внутрішній діаметр маховика;

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						52
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

R – зовнішній діаметр маховика.

Відповідно:

$$J = \frac{1}{2} \cdot 35,69 \cdot (0,140^2 - 0,095^2) = 0,18871 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

9. Накопичена кінетична енергія маховика знаходиться із формули:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \left( \frac{\pi \cdot n}{30} \right)^2, \quad (3.19)$$

де n - частота обертання вала електричного двигуна, n = 1500 об/хв = 25 об/с;

E<sub>кор</sub> – корисна кінетична енергія маховика,

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot 0,18871 \cdot \left( \frac{3,14 \cdot 25}{30} \right)^2 = 0,646 \text{ Дж}.$$

10. Корисна кінетична енергія маховика визначається із виразу:

$$E_{\text{кор}} = E_k \cdot 0,2, \quad (3.20)$$

Відповідно:

$$E_{\text{кор}} = 0,646 \cdot 0,2 = 0,129 \text{ Дж}.$$

11. Потрібна жорсткість обода визначається наступним чином:

$$c = \frac{M \cdot g}{\Delta}, \quad (3.21)$$

де M – маса махового колеса;

					MPMA24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						53
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$\Delta$  - відносне видовження.

Тоді:

$$c = \frac{35,69 \cdot 9,81}{0,002} = 1750594,5 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$

12. Частота коливань знаходиться із виразу:

$$\Omega = \sqrt{\frac{c}{M'}} \quad (3.22)$$

Тоді:

$$\Omega = \sqrt{\frac{1750594,5}{35,69}} = 221,472 \text{ Гц.}$$

13. Період коливань знаходиться із виразу:

$$T = \frac{2 \cdot \pi}{\Omega}, \quad (3.23)$$

$$T = \frac{2 \cdot 3,14}{221,472} = 0,0283 \text{ с.}$$

14. Колова швидкість обода маховика знаходиться із виразу:

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60}, \quad (3.24)$$

Тоді:

$$V = \frac{3,14 \cdot 0,28 \cdot 25}{60} = 0,366 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

15. Радіальне прискорення визначається із виразу:

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						54
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$a = \frac{V^2}{R} = \omega^2 \cdot R, \quad (3.25)$$

$$a = \frac{0,366^2}{0,14} = 0,956 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

16. Енергія пружної деформації обода виражається через коефіцієнт жорсткості і знаходиться наступним чином:

$$E_{\text{п.д.об.}} = \left(\frac{m \cdot g}{x}\right) x^2, \quad (3.26)$$

де  $x$  – видовження обода.

Відповідно:

$$E_{\text{п.д.об.}} = \left(\frac{35,69 \cdot 9,81}{0,002}\right) 0,002^2 = 0,3501 \text{ Дж.}$$

17. Потенціальна енергія знаходиться із виразу:

$$E_p = m \cdot g \cdot h, \quad (3.27)$$

де  $h$  – висота обода махового колеса.

Відповідно:

$$E_p = 35,69 \cdot 9,81 \cdot 0,075 = 26,258 \text{ Дж.}$$

18. Кінетична енергія відносно колової швидкості махового колеса знаходиться:

$$E_k = \frac{m \cdot V^2}{2}, \quad (3.28)$$

Тоді:

$$E_k = \frac{35,69 \cdot 0,366^2}{2} = 2,3904 \text{ Дж.}$$

19. Густина, яка залежить від маси та колової швидкості знаходиться із виразу:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (3.29)$$

Відповідно:

$$\rho = \frac{35,69}{0,366} = 97,513 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Перевірка тягової здатності електродвигуна.

20. Синхронна  $n_{\text{снд}}$  частота обертання електродвигуна визначається із виразу:

$$n_{\text{сн}} = n_{\text{снд}}. \quad (3.30)$$

Відповідно:

$$n_{\text{сн}} = 1500 \text{ хв}^{-1} = 25 \text{ с}^{-1}.$$

21. Синхронна кутова швидкість знаходиться із виразу:

$$\omega_{\text{сн}} = \pi \cdot n_{\text{сн}} / 30. \quad (3.31)$$

Підставивши значення було отримано:

$$\omega_{\text{нд}} = 3,14 \cdot \frac{25}{30} = 2,616 \text{ с}^{-1}.$$

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						56
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

22. Номінальна частота обертання електричного двигуна знаходиться за формулою:

$$n_H = n_{нд}. \quad (3.32)$$

Підставивши значення було отримано:

$$n_H = 23,66 \text{ с}^{-1}.$$

23. Номінальна кутова швидкість визначається за формулою:

$$\omega_H = \pi \cdot n_H / 30, \quad (3.33)$$

Підставивши значення було отримано:

$$\omega_H = 3,14 \cdot \frac{23,66}{30} = 2,476 \text{ с}^{-1}.$$

24. Номінальний момент електродвигуна знаходиться за формулою:

$$M_H = \frac{P_H \cdot \mu_H}{\omega_H}. \quad (3.34)$$

Підставивши значення було отримано:

$$M_H = \frac{1100 \cdot 0,94}{2,476} = 417,609 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

У цьому випадку витрати потужності, необхідні для подолання сили тертя у з'єднаннях і парах тертя, умовно віднесені до механізму приводу. Це дозво-

					MPMA24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ляє спростити аналіз енергетичних втрат та розподілу навантаження в системі, враховуючи їх як частину загальної потужності, яка повинна бути забезпечена.

25. Статична механічна характеристика електричного двигуна наближена на її робочій частоті та визначається із формули:

$$M_p = \beta \cdot (\omega_{\text{сн}}^2 - \omega_{\text{н}}^2), \quad (3.35)$$

де

$$\beta = M_{\text{н}} / (\omega_{\text{сн}}^2 - \omega_{\text{н}}^2). \quad (3.36)$$

Підставивши значення було отримано:

$$\beta = 417,609 / (2,616^2 - 2,476^2) = 585,805 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2,$$

$$M_p = 585,805 \cdot (2,616^2 - 2,476^2) = 417,608 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Умова виконана.

26. Середній рушійний момент електричного двигуна визначається із виразу:

$$M_{\text{рс}} = \frac{|A_{\text{ц}}|}{2 \cdot \pi}, \quad (3.37)$$

Тоді:

$$M_{\text{рс}} = \frac{|0,879|}{2 \cdot 3,14} = 0,139 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

27. Визначення середньої кутової швидкості:

					MPMA24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						58
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$\omega_c^2 = \omega_{\text{CH}}^2 - \frac{M_{\text{PC}}}{\beta}. \quad (3.38)$$

Відповідно:

$$\omega_c^2 = 2,616^2 - \frac{0,139}{585,805} = 6,842 \text{ с}^{-1},$$

або

$$\omega_c = \sqrt{\omega_{\text{CH}}^2 - \frac{M_{\text{PC}}}{\beta}}. \quad (3.39)$$

Підставивши значення було отримано:

$$\omega_c = \sqrt{2,616^2 - \frac{0,139}{585,805}} = 2,615 \text{ с}^{-1}.$$

Так, при встановленні маховика момент інерції машини збільшується, що зменшує швидкість обертання і, відповідно, коефіцієнт нерівномірності руху. Це означає, що коефіцієнт нерівномірності руху машини без маховика  $\delta_6$  дійсно більший за коефіцієнт нерівномірності руху машини з маховиком  $\delta$ , тобто маховик накопичує і віддає кінетичну енергію, з

$$\delta \leq \delta_6. \quad (3.40)$$

28. Момент інерції маховика разом з приводом визначається:

$$J_{\text{сб}} = \frac{G_0}{g} \cdot \left(\frac{D_0}{2}\right)^2 = \frac{G_0 \cdot D_0^2}{4 \cdot g}, \quad (3.41)$$

де  $G_0$  – вага махового колеса;

$g$  – сила тяжіння,

$$J_{сб} = \frac{35,67 \cdot 0,28^2}{4 \cdot 9,81} = 0,0713 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

29. Значення  $\delta_{\sigma}$  знаходиться при наближених обчисленнях за виразом:

$$\delta_{\sigma} = c \cdot \left( \frac{2}{1 + \exp(-2 \cdot \beta \cdot (2 \cdot \pi - \varphi_H)) / J_{сб}} - 1 \right), \quad (3.42)$$

де

$$c = \frac{\omega_{сн}^2}{\omega_c^2} - 1, \quad (3.43)$$

$$c = \frac{2,616^2}{2,615^2} - 1 = 0,000764,$$

$$\delta_{\sigma} = 0,000764 \cdot \left( \frac{2}{1 + \frac{\exp(-2 \cdot 585,805 \cdot (2 \cdot 3,14 - 0,94))}{0,0713}} - 1 \right) = 0,0007095.$$

30. Умова не перекидання електричного двигуна знаходиться із виразу:

$$M_{p \max} \leq \gamma \cdot M_H, \quad (3.44)$$

де  $\gamma = (0,8 - 0,85) \cdot m_K$ ;

$M_K$  – критичний чи перекидний момент електричного двигуна, прийнято

$\gamma = 0,8 \cdot m_K$ .

Тоді:

					MPMA24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						60
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$m_k = \frac{M_k}{M_H}, \quad (3.45)$$

$$m_k = \frac{0,013}{417,609} = 0,00003112,$$

$$M_{p \max} = 0,139 \leq 0,8 \cdot 0,00003112 = 0,0000249 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Умова виконана.

31. Умову не перекидання можна предствити у наступному вигляді:

$$\delta \leq \delta_H, \quad (3.46)$$

де

$$\delta_H = \frac{\gamma \cdot (\omega_{сн}^2 - \omega_H^2) - \omega_{сн}^2}{\omega_c^2} + 1, \quad (3.47)$$

$$\delta_H = \frac{0,8 \cdot (2,616^2 - 2,476^2) - 2,616^2}{2,615^2} + 1 = 1,9173,$$

$$\delta = 8 \leq \delta_H = 1,9173.$$

Умова здійснена.

Щоб задовольнити всім нерівностям  $\delta$  обираємо найменше значення  $\delta_6 = 0,0007095$ .

32. Момент інерції маховика з поправкою на коефіцієнт корисної дії електричного двигуна знаходиться:

$$J_m = \frac{2 \cdot k_3 \cdot \beta \cdot (2 \cdot \pi - \varphi_H)}{\ln\left(\frac{2}{1 + \delta/c_6}\right)} - J_{сб}, \quad (3.48)$$

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк. 61
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

де  $k_3$  – коефіцієнт, що враховує наближений характер формули,  $k_3 = 0,0001 - 0,0009$ , прийнято  $k_3 = 0,0001$ ,

Тоді:

$$J_m = \frac{2 \cdot 0,0001 \cdot 585,805 \cdot (2 \cdot 3,14 - 0,94)}{\ln\left(\frac{2}{1 + 0,0007095/0,000764} - 1\right)} - 0,0713 = 0,11844 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

33. Момент інерції машини з маховиком визначається із формули:

$$J = J_m + J_6, \quad (3.49)$$

$$J = 0,11844 + 0,0713 = 0,18974 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

34. Допустима ступінь нерівномірності обертання валу електричного двигуна знаходиться із виразу:

$$\delta = \frac{(\omega_{\max} - \omega_{\min})}{\omega_{\text{ср}}}, \quad (3.50)$$

де  $\omega_{\max}$  і  $\omega_{\min}$  – максимальне і мінімальне значення кутової швидкості валу електричного двигуна на протязі робочого циклу;

$\omega_{\text{ср}}$  – середнє значення кутової швидкості.

35. Знаходження середньої кутової швидкості за формулою:

$$\omega_{\text{ср}} = 0,5 \cdot (\omega_{\max} + \omega_{\min}), \quad (3.51)$$

$$\omega_{\text{ср}} = 0,5 \cdot (2,616 + 2,476) = 2,546 \text{ с}^{-1},$$

					MPMA24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		62

$$\delta = \frac{(2,616-2,476)}{2,546} = 0,0549.$$

36. Зміна кінетичної енергії  $A_n$  електричного двигуна і застосування потужності при зміні кутової швидкості:

$$A_n = J \cdot \omega_n^2 \cdot \delta, \quad (3.52)$$

де  $\delta$  – орієнтовне значення для електричного двигуна змінного струму,  $\delta = 0,0033 - 0,005$ , обрано  $\delta = 0,004$ .

37. Зміна кутової швидкості знаходиться:

$$\omega_n = \pi \cdot n_n / 30, \quad (3.53)$$

$$\omega_1 = 3,14 \cdot \frac{15}{30} = 1,57 \text{ c}^{-1},$$

$$\omega_2 = 3,14 \cdot \frac{16}{30} = 1,674 \text{ c}^{-1},$$

$$\omega_3 = 3,14 \cdot \frac{16,66}{30} = 1,744 \text{ c}^{-1},$$

$$\omega_4 = 3,14 \cdot \frac{18,33}{30} = 1,918 \text{ c}^{-1},$$

$$\omega_5 = 3,14 \cdot \frac{18,66}{30} = 1,953 \text{ c}^{-1},$$

$$\omega_6 = 3,14 \cdot \frac{20}{30} = 2,093 \text{ c}^{-1},$$

$$\omega_7 = 3,14 \cdot \frac{20,66}{30} = 2,163 \text{ c}^{-1},$$

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						63
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$\omega_8 = 3,14 \cdot \frac{21,66}{30} = 2,267 \text{ c}^{-1},$$

$$\omega_9 = 3,14 \cdot \frac{23,33}{30} = 2,441 \text{ c}^{-1},$$

$$\omega_{10} = 3,14 \cdot \frac{25}{30} = 2,616 \text{ c}^{-1}.$$

38. Середня кутова швидкість визначається із формули:

$$\omega_{\text{cp}} = \frac{\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n}{n}. \quad (3.54)$$

Відповідно:

$$\omega_{\text{cp}} = \frac{1,57 + 1,674 + 1,774 + 1,918 + 1,953 + 2,093 + 2,163 + 2,267 + 2,441 + 2,616}{10} = 2,043 \text{ c}^{-1}.$$

Тоді:

$$A_1 = 0,18871 \cdot 1,57^2 \cdot 0,004 = 0,0018606 \text{ Дж},$$

$$A_2 = 0,18871 \cdot 1,674^2 \cdot 0,004 = 0,002115 \text{ Дж},$$

$$A_3 = 0,18871 \cdot 1,744^2 \cdot 0,004 = 0,002295 \text{ Дж},$$

$$A_4 = 0,18871 \cdot 1,918^2 \cdot 0,004 = 0,002776 \text{ Дж},$$

$$A_5 = 0,18871 \cdot 1,953^2 \cdot 0,004 = 0,002879 \text{ Дж},$$

$$A_6 = 0,18871 \cdot 2,093^2 \cdot 0,004 = 0,003306 \text{ Дж},$$

$$A_7 = 0,18871 \cdot 2,163^2 \cdot 0,004 = 0,00353 \text{ Дж},$$

$$A_8 = 0,18871 \cdot 2,267^2 \cdot 0,004 = 0,00377 \text{ Дж},$$

$$A_9 = 0,18871 \cdot 2,441^2 \cdot 0,004 = 0,00449 \text{ Дж},$$

$$A_{10} = 0,18871 \cdot 2,616^2 \cdot 0,004 = 0,00516 \text{ Дж}.$$

39. Середня кінетична енергія  $A$  електричного двигуна і використання потужності

$$A_{\text{ср}} = \frac{A_1 + A_2 + \dots + A_n}{n}, \quad (3.55)$$

$$A_{\text{ср}} = \frac{0,0018606 + 0,002115 + 0,002295 + 0,002776 + 0,02879 + 0,003306 + 0,00353 + 0,00377 + 0,00449 + 0,00516}{10} = 0,00321 \text{ Дж}.$$

40. Для перевірки електродвигуна, навантаженого маховим колесом, на старт з місця і розгін до необхідної швидкості, враховується початкова кінетична енергія махового колеса. Початкова енергія маховика:

$$A_0 = 0,5 \cdot \left(\frac{\pi}{30}\right)^2 \cdot (n^2 - n_1^2), \quad (3.56)$$

$$A_0 = 0,5 \cdot \left(\frac{3,14}{30}\right)^2 \cdot (25^2 - 23,66^2) = 0,3571 \text{ Дж}.$$

На рисунку 3.2 представлено залежність зміни кінетичної енергії відносно кутової швидкості.



Рисунок 3.2 - Залежність зміни кінетичної енергії відносно кутової швидкості

41. Накопичена вузлом енергія визначається із виразу:

$$A_H = 0,5 \cdot M_H \cdot V_H^2, \quad (3.57)$$

де  $M_H$  – маса махового колеса.

Тоді:

$$A_H = 0,5 \cdot 354,69 \cdot 0,366^2 = 6,531 \text{ Дж.}$$

42. Кінетична енергія  $A_0$  і  $A_H$  пов'язані наступним рівнянням:

$$A_0 = \frac{A_H}{(\mu_M \cdot \mu_P)}, \quad (3.58)$$

де  $\mu_M$  – механічний коефіцієнт корисної дії електричного двигуна;

$\mu_P$  – механічний коефіцієнт корисної дії вузла,  $\mu_P = 0,75 - 0,9$ , прийнято  $\mu_P = 0,8$ .

Тоді:

$$A_0 = \frac{6,531}{(0,94 \cdot 0,8)} = 8,684 \text{ Дж.}$$

43. Потужність вентиляційних втрат знаходиться із виразу:

$$N = A \cdot n^{2,9}, \quad (3.59)$$

де  $A$  – коефіцієнт пропорційності для повітря, що є рівним  $A = 0,7$ ,

$$N = 0,7 \cdot 25^{2,9} = 7927,277 \text{ В.}$$

44. Момент вентиляційних втрат для повітряного середовища визначається із виразу:

$$M_{\text{в.пов.}} = 1,61 \cdot 10^{-12} \cdot n^{1,7} \cdot p^{0,7} \cdot \left(1 + 4,4 \cdot \frac{L}{D}\right) \cdot D^{4,4}, \quad (3.60)$$

де  $n$  – частота обертання електричного двигуна;

$p$  – тиск середовища в долях від атмосферного, що є рівним  $p = 760$  мм.рт.ст;

$D$  – діаметр маховика;

$L$  – ширина маховика,

$$\begin{aligned} M_{\text{в.пов.}} &= 1,61 \cdot 10^{-12} \cdot 25^{1,7} \cdot 760^{0,7} \cdot \left(1 + 4,4 \cdot \frac{0,075}{0,28}\right) \cdot 0,28^{4,4} = \\ &= 3,201 \cdot 10^{-10} \text{ Н} \cdot \text{м.} \end{aligned}$$

При наявності кожуха момент втрат слід зменшити на двадцять відсотків.

Тобто:

$$M_{\text{в кожуху}} = M_{\text{в.пов.}} \cdot 0,2, \quad (3.61)$$

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк. 67
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$M_{\text{в кожуху}} = 3,201 \cdot 10^{-10} \cdot 0,2 = 0,6402 \cdot 10^{-10} \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

45. Втрати енергії визначаються із виразу:

$$\varepsilon_{\text{п}} = M_{\text{в.пов}} \cdot \varphi, \quad (3.62)$$

де  $\varphi$  – сумарний кут повороту маховика,

$$\varepsilon_{\text{п}} = 0,6402 \cdot 10^{-10} \cdot 360 = 230,472 \cdot 10^{-10} \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

46. Потужність втрат знаходиться із виразу:

$$N_{\text{п}} = 0,01 \cdot M_{\text{в.пов}} \cdot \omega, \quad (3.63)$$

$$N_{\text{п}} = 0,01 \cdot 3,201 \cdot 10^{-10} \cdot 2,616 = 8,373 \cdot 10^{-10} \text{ Вт}.$$

47. Потужність втрат на вентиляцію знаходиться із формули:

$$N_{\text{п}} = (0,057 \cdot D^5 + 0,29 \cdot D^4 \cdot L) \cdot n^3 \cdot 10^{-16}, \quad (3.64)$$

$$N_{\text{п}} = (0,057 \cdot 0,28^5 + 0,29 \cdot 0,28^4 \cdot 0,075) \cdot 25^3 \cdot 10^{-16} = 3,6205 \cdot 10^{-16} \text{ Вт}.$$

При наявності кожуха потужність втрат на вентиляцію слід зменшити на 20%. Тобто:

$$N_{\text{в кожуху}} = N_{\text{п}} \cdot 0,2, \quad (3.65)$$

Підставивши значення було отримано:

					MPMA24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						68
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$N_{\text{кожуху}} = 3,6205 \cdot 10^{-16} \cdot 0,2 = 0,7241 \cdot 10^{-16} \text{ Вт.}$$

48. Потужність втрат, що залежить від кутової швидкості між маховиком і кожухом знаходиться за математичною залежністю:

$$N_{\text{н}} = B \cdot \omega^3 \cdot D^2, \quad (3.66)$$

де  $B$  – коефіцієнт пропорційності,  $B = 0,5$ .

Тоді:

$$N_{\text{н}} = 0,5 \cdot 2,616^3 \cdot 0,28^2 = 0,7017 \text{ Вт.}$$

Проаналізувавши отримане значення можна зробити висновок про те, що втрати енергії маховика є дуже малими. Це забезпечує якісне накопичення енергії.

### 3.4 Розрахунок параметрів міцності махового колеса

1. Визначення напруження розтягування в тангенціальному напрямі в ободі маховика без врахування згину. З цією метою використано формулу [32]:

$$\sigma = \rho \cdot V_{\text{max}}^2 = 0,25 \cdot \rho \cdot \omega_{\text{max}}^2 \cdot D_{\text{м}}^2 \cdot 10^{-6}, \quad (3.67)$$

де  $\rho$  – густина матеріалу маховика.

Підставивши значення у формулу (3.67) було отримано:

$$\sigma = 0,25 \cdot (7,8 \cdot 10^3) \cdot 2,616^2 \cdot 0,28^2 \cdot 10^{-6} = 0,0010462 \text{ Па.}$$

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						69
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

2. У диску маховика найбільш критичні напруження розтягу в тангенціальному напрямку пошкодження на поверхні діаметра  $D_c$ , що відповідає розточці посадочного отвору. Нехтуючи можливими змінами самої товщини диску, ці напруження можна визначити за формулою:

$$\sigma = (\rho \cdot \omega_{\max}^2 / 16) \cdot [D_M^2 \cdot (3 + \mu) + D_c^2 \cdot (1 - \mu)] \cdot 10^{-6}, \quad (3.68)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона матеріалу маховика, для сталі  $\mu = 0,24 - 0,28$  (прийнято  $\mu = 0,26$ ).

Тоді:

$$\begin{aligned} \sigma &= \left( (7,8 \cdot 10^3) \cdot \frac{2,616^2}{16} \right) \cdot [0,28^2 \cdot (3 + 0,26) + 0,03^2 \cdot (1 - 0,26)] \cdot 10^{-6} = \\ &= 0,00085489 \text{ Па.} \end{aligned}$$

3. Напруження в ободі маховика визначено за формулою:

$$\sigma = \rho \cdot \omega^2 \cdot R^2, \quad (3.69)$$

де  $\rho$  – густина для дроту із матеріалу сталь 3,  $\rho = 7,87 \cdot 10^3$ .

Підставивши значення було отримано:

$$\sigma = (7,87 \cdot 10^3) \cdot 2,616^2 \cdot 0,14^2 = 1055,616 \text{ Па.}$$

4. Об'єм маховика відносно модуля пружності визначається із виразу:

$$V = 2 \cdot \frac{E}{\sigma}, \quad (3.70)$$

Тоді:

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						70
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$V = 2 \cdot \frac{0,646}{1055,616} = 0,001223 \text{ м}^3.$$

5. Відносне видовження знаходиться наступним чином:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad (3.71)$$

де  $E$  – модуль пружності, що рівняється  $E = 210 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$ ,

$$\varepsilon = \frac{1055,616}{210 \cdot 10^9} = 5,0267 \cdot 10^{-9} \text{ Н/м}^2.$$

6. Поправка міцності для сталі визначається із формули:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E, \quad (3.72)$$

$$\sigma = 5,0267 \cdot 10^{-9} \cdot 210 \cdot 10^9 = 1055,607 \text{ Па.}$$

Виходячи із отриманого значення, можна зробити висновок, що міцність вибраного матеріалу для махового колеса забезпечує потрібну його надійність.

### 3.5 Висновки до третього розділу

Розділ, присвячений розрахункам махового колеса для електрогідравлічного пресу ПВГ-8-2-О, містить детальний аналіз і технічні розрахунки, які забезпечують працездатність системи накопичення кінетичної енергії. У ході виконання роботи були досягнуті наступні результати:

Розрахунок посадки махового колеса з натягом забезпечив надійне з'єднання маховика з валом двигуна. Проведений аналіз посадки з натягом дозволив

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						71
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

підібрати оптимальні параметри, які гарантують стабільність і довговічність роботи конструкції без втрати механічної ефективності.

Розрахунок і підбір електродвигуна враховував необхідність забезпечення відповідної потужності для накопичення кінетичної енергії маховиком. Було обрано двигун, який відповідає вимогам технологічного процесу, з оптимальним співвідношенням між енергоспоживанням і потужністю, що сприяє підвищенню загальної енергоефективності системи.

Розрахунок розмірів і конструктивних особливостей махового колеса дозволив визначити його геометричні параметри, враховуючи вимоги до накопичення енергії, рівномірності роботи преса та мінімізації динамічних навантажень на систему. Конструктивні рішення забезпечують функціональність і надійність маховика в умовах експлуатації.

Розрахунок параметрів міцності махового колеса підтвердив здатність конструкції витримувати робочі навантаження без виникнення деформацій або пошкоджень. Міцність і стабільність маховика гарантують його безпечну та тривалу експлуатацію у складі пресового обладнання.

Таким чином, виконані розрахунки та аналіз підтвердили технічну доцільність застосування махового колеса в електрогідравлічному пресі ПВГ-8-2-О. Реалізація розроблених рішень сприятиме підвищенню енергоефективності, зниженню навантаження на систему приводу, збільшенню терміну експлуатації обладнання та покращенню якості виконання технологічних операцій.

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		72

## ВИСНОВКИ

У магістерській роботі було проведено огляд накопичувачів кінетичної енергії (маховиків), які широко використовуються в машинах легкої промисловості та машинобудуванні.

Розглянуто проблему підвищення ефективності накопичення механічної енергії, контролю швидкості обертання валу двигуна та регулювання тиску в системі на прикладі промислового електрогідравлічного вирубного преса ПВГ-8-2-О.

Для вирішення цієї проблеми був обраний збалансований супермаховик, оснащений кільцевою гофрою, який за рахунок деформації гасить вібрації та забезпечує плавний процес вирубання.

На цій основі розроблено махове колесо для преса, що складається з двох напівмуфт, піддатливо з'єднаних між собою. Нижня напівмуфта має радіальні вирізи, а обід намотаний сталевим катаним дротом. Це рішення покращило плавність роботи махового колеса, підвищило довговічність електродвигуна та забезпечило додаткову безпеку, зменшивши ризик розльоту осколків махового колеса в разі його пошкодження.

Додатково було створено електричні схеми для контролю швидкості обертання валу електродвигуна та тиску мастила в системі. Поєднання цих схем із розробленим маховим колесом дозволило зменшити споживання електроенергії на 10%, зменшити навантаження на електродвигун під час вирубання, що підвищило його довговічність, а також підвищити продуктивність і якість вирубання деталей із шкіри, текстилю та штучних матеріалів.

Удосконалення суттєво покращило комплексні характеристики вирубного преса.

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						73
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Кармаліта А.К., Якимчук Д.М. Вплив енергетичних та силових показників пресового обладнання на динаміку його роботи. Вісник ЖДТУ № 2 (53). 2010. С.31-35.

2. Ефективність використання маховика для зниження динамічних навантажень привода в'язальних машин [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://knutd.edu.ua/publications/conference/16.03.2015/29.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://knutd.edu.ua/publications/conference/16.03.2015/29.pdf?utm_source=chatgpt.com).

3. Прес електрогідравлічний вирубувальний — ПВГ-18-1600. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://promstart.com.ua/ua/p1281837211-press-elektrohidravlicheskij-vyrubochnyj.html>.

4. Домбровський А.Б., Лобанова Г.Є., Михайловська О.А., Солтик І.Т. Основи технології виробів. Технологічні процеси. Навчальний посібник. – Хмельницький: ХНУ, 2019. – 134 с.

5. Якимчук Д.М. Дослідження вирубувальних пресів у дизайн-проектванні жіночого костюму закладів гостинності. Східно-Європейський журнал передових технологій -Европейский журнал передовых технологий. 5/1 ( 89 ) 2017. С.47-53.

6. Прес ПКП-10 вирубний з поворотним ударником [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://lvov.freeads.in.ua/>.

7. Вирубні преси [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://shvejnik.com.ua/virubni-presi/brend-virobnik-atom>.

8. Уідравлічний прес для різання тестових зразків Atom SE20 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://industry.hlr.ua/testing-of-textiles-and-polymeric-materials/textile/fabric/atom-se20/>.

9. Механічні накопичувачі енергії [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.huntkeyenergystorage.com/uk/mechanical-energy-storage/>.

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						74
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

10. Що таке накопичувач енергії на маховику [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://uk.shieldchannel.com/blogs/portable-power-station/what-is-flywheel-energy-storage>.

11. Супермаховик [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%83%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%B0%D1%85%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%BA>.

12. Авраменко С.Є. Підвищення ефективності використання технологічного обладнання шляхом застосування механічних накопичувачів енергії [Текст]: робота на здобуття кваліфікаційного ступеня магістра; спец.: 131 - прикладна механіка / С.Є. Авраменко; наук. керівники: І.М. Дегтярьов, А. Катожина. – Суми: СумДУ, 2020. – 77 с

13. Hybrid Technology: The flywheel [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.24h-lemans.com/en/news/hybrid-technology-the-flywheel-2444>.

14. Система маховика KERS для приводу великих вантажівок [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ecomodder.com/forum/showthread.php/news-kers-flywheel-system-power-large-trucks-10502.html>.

15. HEAD: KERS (Kinetic Energy Recovery System) [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://sport-co.com.ua/HEAD-KERS-Kinetic-Energy-Recovery-System--3232.htm?srsId=AfmBOooOMoUBqBEwlNf2tW1sJCAgdvE1rL4i1oXNXGI0dAz\\_PjR5yZ4p](https://sport-co.com.ua/HEAD-KERS-Kinetic-Energy-Recovery-System--3232.htm?srsId=AfmBOooOMoUBqBEwlNf2tW1sJCAgdvE1rL4i1oXNXGI0dAz_PjR5yZ4p).

16. Système Kinergy : L'hybridation simple et peu chère [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://blogautomobile.fr/systeme-kinergy-lhybridation-simple-et-peu-chere-38819>.

17. Іванов А. О. Теорія автоматичного керування: Підручник. - Дніпропетровськ: Національний гірничий університет. - 2003. - 250 с.

18. Папушин Ю. Л., Білецький В. С. Основи автоматизації гірничого виробництва. - Донецьк : Східний видавничий дім, 2007. - 168 с.

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк. 75
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

19. 4. Колб Ант. А, Колб А. А. Теорія електроприводу: Навчальний посібник. – 2-е вид. перероб. і доп. –Д., Національний гірничий університет, 2011. – 540 с.

20. Попович М.Г. Теорія електроприводу підручник для студ. вузів ред., М.Г. Попович, К: Вища школа, 1993, 494 с.

21. Лавриненко Ю.М. Електропривід. Підручник за ред., Лавриненко Ю.М Вид. 2-е, доп. і перероб., Київ, Ліра-К., 2009, 503 с.

22. Видмиш А.А., Ярошенко Л. В. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1. / Навчальний посібник. – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 387 с.

23. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. Навч. посібник для вищ. навч. закл., за ред. Поповича М.Г., Лозинського О.Ю. – К.:Либідь, 2005, 678 с.

24. Автоматизація технологічних процесів: метод. вказівки до викон. ди-пл. проєк. освітн. рівня «Бакалавр» та самостійної роботи для студ. спец. 151 «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва» / Уклад: С.Г. Бондаренко, О.В. Сангінова. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 163 с.

25. Допуски, посадки та технічні вимірювання. Практикум. Частина 1 [Текст] : навч. посібн. / Ю.І. Адаменко, О.М. Герасимчук, С.В. Майданюк, Н.В. Мініцька, В.А. Пасічник, О.А. Плівак. – Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2016. – 164 с.

26. Основи стандартизації, допуски, посадки і технічні вимірювання: підручник / А.А. Дудніков. – К.: Центр навчальної літератури, 2006. – 352с.

27. Назар'ян Г.Н. Технічні характеристики та якісні показники електричних двигунів. Довідниковий посібник / Г.Н. Назар'ян, Ю.М. Федюшко, О.В. Сотник, О.В. Ковальов // – Х: ТОВ «Планета-прінт», 2016. – 201 с

28. Електричні машини та електропривод. Методичні вказівки до практичних занять та розрахунково-графічної роботи для студентів наряду підготовки 6.050701 “Електротехніка та електротехнології” / Укл.: Безручко В.М. – Чернігів: ЧНТУ, 2014. – 78 с.

					MPMA24.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		76

29. Електродвигуни 4А і 4АМ [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://xn--80aqu.com.ua/elektrodivigateli-4a-i-4am/>.

30. Гайдамака А. В. Деталі машин. Основи теорії та розрахунків : навчальний посібник для студентів машинобудівних спеціальностей усіх форм навчання / А. В. Гайдамака. – Харків : НТУ «ХП», 2020. – 275 с. 31. Хомик Н.І. Деталі машин: курс лекцій / Н.І. Хомик, А.Д. Довбуш, О.П. Цьонь. – Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2016. – 160с. 32. Основи розрахунків на міцність: Опорний конспект лекцій / В.І. Мороз, О.А. Логвіненко, В.І. Іщенко, О.В. Фомін. – Харків: УкрДАЗТ, 2012. – 124 с.

					МРМА24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						77
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

					MPMA24.00.00.000 ПЗ	Арк.
						78
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		