

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ**

Кафедра прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри
Олег ЛЕВЧЕНКО
(підпис)

“ ” _____ 2026 р.

**Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Автоматизовані та роботизовані
механічні системи»
спеціальності 131 Прикладна механіка**

на тему: Розроблення джерела безперебійного живлення, побудованого на основі технології накопичення кінетичної енергії _____

Виконав: студент 4 курсу, групи МА-22

Левченко Денис Дмитрович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник професор, д.т.н. Струтинський С.В.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант з охорони праці _____ професор, д.т.н. Струтинський С.В.
(назва розділу) (вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Консультант з технології машинобудування _____ к.т.н., доц. Кореньков В.М.
(назва розділу) (вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2026 рік

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий механіко-машинобудівний інститут
Кафедра прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 131 Прикладна механіка

Освітньо-професійна програма «Автоматизовані та роботизовані механічні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Олег ЛЕВЧЕНКО

(підпис)

“ _____ ” _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проєкт студенту

Левченко Денису Дмитровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту_ Розроблення джерела безперебійного живлення, побудованого на основі технології накопичення кінетичної енергії _____

керівник проєкту_ Професор, д.т.н. Струтинський С.В. _____,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджена наказом по університету від “ 01 ” червня 2026 року № 2019-с

2. Термін подання студентом проєкту _____

3. Вихідні дані до проєкту _ Необхідно розробити джерело безперебійного живлення, що має наступні параметри: _потужність 800 Вт; вхідна напруга 220 В; частота 50 Гц; час автономної роботи 4 хв; _орієнтовні габарити: 430 (Д) * 430 (Ш) * 430(В).

4.Зміст пояснювальної записки. Аналіз досліджень та публікацій по тематиці та вибір схемного рішення (аналіз типів джерел безперебійного живлення, конструкцій роторів та підшипників, матеріали, кінематичні схеми, систем керування). Розробка системи керування джерела безперебійного живлення. Розрахунок основних параметрів накопичувача кінетичної енергії, розрахунок валу та підшипників. Підбір комплектуючих (двигун, генератор, підшипники, електронні компоненти). Розрахунки інерційних властивостей ротора, розрахунки на міцність та надійність, визначення геометричних розмірів. Розробка технології виготовлення багатоступінчастого валу; Охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень, плакатів, презентацій тощо): електрична схема джерела безперебійного живлення, система керування джерела безперебійного живлення, складальне креслення джерела безперебійного живлення, деталювання джерела безперебійного живлення, твердотільна модель джерела безперебійного живлення.

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1. Охорона праці	Професор, д.т.н. Струтинський С.В.		
2. Технологія машинобудування	доц. Кореньков В.М.		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналіз досліджень та публікацій по тематиці та вибір схемного рішення. (аналіз типів джерел безперебійного живлення, конструкцій роторів та підшипників, матеріали, кінематичні схеми, систем керування).	22.04.2026	
2	Розробка системи керування джерела безперебійного живлення.	30.04.2026	
3	Електрична схема джерела безперебійного живлення	7.05.2026	
4	Розрахунок основних параметрів накопичувача кінетичної енергії, розрахунок валу та підшипників. Підбір комплектуючих (двигун, генератор, підшипники, електронні компоненти).	14.05.2026	
5	Розрахунки інерційних властивостей ротора, розрахунки на міцність та надійність, визначення геометричних розмірів.	20.05.2026	
6	Система керування джерела безперебійного живлення	26.05.2026	
7	Складальне креслення джерела безперебійного живлення	2.06.2026	
8	Деталювання джерела безперебійного живлення, твердотільна модель джерела безперебійного живлення	7.06.2026	
9	Розрахунки інерційних властивостей та розрахунки на міцність	10.06.2026	
10	Розробка технології виготовлення маховика	12.06.2026	
11	Охорона праці	16.06.2026	

Студент

(підпис)

Керівник проекту

(підпис)

Денис Левченко

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Сергій Васильович

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Пояснювальна записка до дипломного проєкту

на тему: Розроблення джерела безперебійного живлення, побудованого на основі технології накопичення кінетичної енергії

Київ – 2026 рік

АНОТАЦІЯ

Бакалаврський дипломний проєкт на тему: «Розроблення джерела безперебійного живлення, побудованого на основі технології накопичення кінетичної енергії» містить 5 розділів. Обсяг пояснювальної записки становить 98 сторінок основного тексту, до складу роботи входять 18 рисунків, 15 таблиць, а також 4 креслення і 2 плакати формату А1 з графічними матеріалами.

На початковому етапі виконання роботи здійснено аналіз сучасних систем безперебійного живлення та технологій акумулювання енергії, зокрема маховикових накопичувачів енергії. Розглянуто існуючі схемні рішення, опрацьовано науково-технічні джерела та визначено ключові особливості функціонування систем накопичення кінетичної енергії, їхні переваги й недоліки, що дало змогу обґрунтувати вибір структурної схеми розроблюваного пристрою.

У межах роботи виконано проєктування основних вузлів системи, а також проведено необхідні розрахунки параметрів установки. Для проєктування та аналізу використано методи розрахунку деталей машин.

Також розроблено технологічний процес виготовлення основного елемента накопичувача кінетичної енергії — маховиків. Отримані результати розрахунків і моделювання дозволяють ще на етапі попереднього проєктування обґрунтовано визначити основні параметри системи та забезпечити її надійну й ефективну роботу.

Ключові слова: джерело безперебійного живлення, акумулятор кінетичної енергії, накопичення кінетичної енергії, маховиковий накопичувач енергії, маховик, моделювання.

ABSTRACT

Bachelor's degree project on the topic: "Development of an Uninterruptible Power Supply Based on Kinetic Energy Storage Technology" consists of 5 chapters. The explanatory note contains 98 pages of main text, and the work includes 18 figures, 15 tables, as well as 4 drawings and 2 posters A1-format with graphic materials.

At the initial stage of the project, an analysis of modern uninterruptible power supply systems and energy storage technologies was carried out, in particular flywheel energy storage systems. Existing circuit solutions were reviewed, scientific and technical sources were studied, and the key features of kinetic energy storage systems, their advantages and disadvantages, were identified. This made it possible to justify the choice of the structural scheme of the developed device.

Within the project, the main system units were designed, and the necessary calculations of the system parameters were performed. Machine design calculation methods were used for the design and analysis.

A technological process for manufacturing the main element of the kinetic energy storage system — flywheels — was also developed. The obtained calculation and modeling results make it possible, already at the preliminary design stage, to reasonably determine the main system parameters and ensure its reliable and efficient operation.

Keywords: uninterruptible power supply, kinetic energy storage, flywheel energy storage system, flywheel, modeling.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ ПО ТЕМАТИЦІ ТА ВИБІР СХЕМНОГО РІШЕННЯ.....	10
1.1. Призначення джерел безперебійного живлення та вимоги до розроблюваної системи	10
1.2. Основні типи джерел безперебійного живлення	11
1.3. Порівняння акумуляторних і кінетичних накопичувачів енергії	13
1.4. Матеріали основних деталей накопичувача.....	21
1.5. Кінематична, електромеханічна схема та система керування ДБЖ з маховиковим накопичувачем.....	24
1.6. Технічні рішення та вибір остаточного схемного рішення.....	27
Висновки до розділу 1	30
2. РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ НАКОПИЧУВАЧА КІНЕТИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ, РОЗРАХУНОК ВАЛУ ТА ПІДШИПНИКІВ. ПІДБІР КОМПЛЕКТУЮЧИХ	32
2.1. Опис системи накопичувача кінетичної енергії та обґрунтування конструктивних рішень	32
2.2. Розрахунок основних параметрів накопичувача кінетичної енергії	34
2.3. Розрахунок валу	39
2.4. Розрахунок підшипників	55
2.5. Підбір комплектуючих	57
Висновки до розділу 2	62
3. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ МАХОВИКА.....	63
3.1. Опис деталі	63
3.2. Вибір заготовки.....	63
3.3. Розробка маршрутного технологічного процесу.....	64
3.4. Оснащення операцій	69
Висновки до розділу 3	73

Зм	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив								
Перевірив								
Т. Контр.								
Н. Контр.								
Затверд.								
					Літера	Аркуш	Аркушів	

4. ОХОРОНА ПРАЦІ	74
4.1 Характеристика приміщення	74
4.2 Електробезпека.....	77
4.3 Пожежна безпека.....	80
4.4 Мікроклімат	84
Висновки до розділу 4	87
ВИСНОВКИ.....	89
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	90

						Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Сучасний розвиток промисловості, інформаційних технологій та систем автоматизації вимагає забезпечення надійного та безперервного електроживлення споживачів. Навіть короточасні перебої в електропостачанні можуть призводити до втрати важливих даних, зупинки технологічних процесів, пошкодження обладнання та значних економічних збитків. Тому особливої актуальності набуває розроблення ефективних систем резервного електроживлення, здатних забезпечити безперервну роботу важливих споживачів.

Одними із перспективних джерел безперебійного живлення є рішення, побудовані на базі технології накопичення кінетичної енергії. Такі системи дозволяють акумулювати енергію у вигляді енергії обертання маховика та швидко віддавати її у вигляді електроенергії у разі зникнення основного джерела живлення. Порівняно з традиційними акумуляторними батареями, накопичувачі кінетичної енергії характеризуються високою надійністю, тривалим терміном служби, швидким зарядженням та відсутністю значного зниження характеристик у процесі експлуатації.

Актуальність дипломного проєкту полягає у розробленні джерела безперебійного живлення на основі технології накопичення кінетичної енергії, що дозволить підвищити надійність електропостачання споживачів та забезпечити ефективне використання енергетичних ресурсів.

Для розробки джерела безперебійного живлення, побудоване на основі технології накопичення кінетичної енергії необхідно провести розрахунки його основних параметрів, зокремарозробити електричну схему та систему керування джерела безперебійного живлення; розрахувати основні параметри системи накопичення кінетичної енергії, вал та підшипники.

						Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ ПО ТЕМАТИЦІ ТА ВИБІР СХЕМНОГО РІШЕННЯ

1.1. Призначення джерел безперебійного живлення та вимоги до розроблюваної системи

Джерело безперебійного живлення належить до технічних засобів резервного електропостачання, які забезпечують підтримання роботи навантаження при зникненні напруги мережі, короткочасних провалах, перенапругах, імпульсних завадах або нестабільності частоти.

У загальному випадку ДБЖ виконує три взаємопов'язані функції:

- накопичує енергію;
- контролює параметри вхідного електроживлення;
- формує на виході напругу, придатну для живлення споживача [1].

У прикладному проєктуванні важливим є не лише факт резервування, а й характер навантаження, допустима тривалість перерви, рівень спотворення форми напруги, спосіб переходу на автономний режим, тепловий режим роботи та ресурс накопичувача [1].

Потреба у ДБЖ зумовлена тим, що більшість сучасних електронних і електромеханічних систем не допускає раптового знеструмлення. Для комп'ютерної техніки раптове знеструмлення може призвести до втрати даних, для систем керування до аварійної зупинки процесу, для медичного обладнання до порушення безперервності роботи, для систем зв'язку та охорони до втрати контролю. У побутових та малих промислових умовах ДБЖ також використовують як проміжну ланку між мережею і генератором, оскільки бензиновому або дизельному генератору потрібен час для запуску, виходу на номінальну частоту та стабілізації напруги [1].

Завданням дипломного проєкту передбачено розроблення джерела безперебійного живлення потужністю 800 Вт, з вхідною напругою 220 В, частотою 50 Гц та часом автономної роботи 4 хв. Орієнтовний габаритний розмір обмежено кубічним простором 430×430×430 мм. З огляду на задану тривалість

						Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

автономної роботи накопичувач не повинен забезпечувати довготривале енергопостачання, а має перекривати короткий проміжок часу між відмовою мережі й підключенням стабільного резервного джерела, тому доцільно розглядати технології з високою питомою потужністю, швидким прийманням і віддаванням енергії, достатньою циклічною довговічністю та прогнозованою механічною надійністю [2].

Розрахункова енергія, яку має віддати накопичувач за 4 хв при навантаженні 800 Вт, визначається добутком потужності на час. Для заданих умов $E = 800 \cdot 240 = 192000$ Дж, або 192 кДж без урахування втрат у перетворювачах, підшипниках, електричній машині та системі керування. Якщо врахувати ККД електромеханічного перетворення, втрати у силовій електроніці, втрати в опорах і необхідний технологічний запас, практично потрібна енергія ротора має бути більшою за 192 кДж. Обрана постановка підтверджує, що проєктована система належить до короточасних буферних накопичувачів, для яких критичною є не енергоемність на багато годин, а швидкість реакції та стабільність вихідної напруги.

Під час вибору схемного рішення оцінюється не окрема деталь, а вся система. Для подальшого проєктування потрібно врахувати такі складові:

- тип архітектури ДБЖ і спосіб переходу на автономний режим;
- вид накопичувача енергії та його ресурс;
- конструкцію ротора, валу, опор і захисного корпусу;
- матеріали основних деталей та їх придатність до розрахунку міцності;
- кінематичну схему, електромеханічний вузол і систему керування.

1.2. Основні типи джерел безперебійного живлення

За архітектурою джерела безперебійного живлення поділяють на три основні типи. У міжнародних позначеннях їм відповідають схеми VFD, VI та VFI. Кожна архітектура має власну сферу застосування, оскільки різниться за якістю стабілізації, часом перемикавання, складністю, ціною, тепловими втратами та вимогами до накопичувача [1].

						Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. Резервне ДБЖ, або Off-line / VFD. У нормальному режимі воно подає навантаженню напругу безпосередньо з мережі. Накопичувач заряджається окремо, а інвертор підключається лише при виході параметрів мережі за допустимі межі. Перевагами схеми є простота, низька вартість і мале власне споживання. Недоліком є пауза перемикання, слабша фільтрація завад і обмежена стабілізація напруги [1].

2. Лінійно-інтерактивне ДБЖ, або VI. Воно працює від мережі, але має вузол автоматичного регулювання напруги. Часто для цього застосовується ступеневий автотрансформатор або електронний регулятор. Накопичувач залучається тоді, коли мережа зникає або її параметри не можуть бути виправлені в допустимому діапазоні. Порівняно з резервною схемою такий варіант краще захищає навантаження і зменшує кількість повних розрядів накопичувача [3].

3. ДБЖ подвійного перетворення, або On-line / VFI. У цій схемі змінна напруга мережі спочатку перетворюється у постійну, а потім інвертор знову формує змінну напругу для навантаження. Перевагою є висока якість вихідної напруги та майже безперервний перехід на накопичувач. Недоліками є вища ціна, більші втрати, нагрів і складніша силова частина (табл. 1.1) [1].

Для проєктованої установки потужністю 800 Вт основним призначенням є короткочасна підтримка роботи системи до моменту запуску або стабілізації бензинового генератора. У таких умовах немає потреби постійно пропускати всю енергію через подвійне перетворення, якщо навантаження допускає корекцію напруги та короткий керований перехід. Резервна схема, навпаки, має недостатню якість стабілізації та гірше узгоджується з вимогою до надійної роботи при частих відхиленнях напруги. Лінійно-інтерактивна архітектура забезпечує компроміс між вартістю, ККД, якістю живлення і ресурсом накопичувача, що робить її доцільною базою для подальшої розробки.

Таблиця 1.1 - Порівняння основних архітектур джерел безперебійного живлення

Тип ДБЖ	Принцип роботи	Переваги	Недоліки	Доцільність для проєкту
Резервний Off-line / VFD	Навантаження живиться від мережі, інвертор вмикається при аварії	Простота, низька ціна, високий ККД у нормальному режимі	Є затримка перемикавання, слабка стабілізація	Недостатній рівень захисту для обраної системи
Лінійно-інтерактивний / VI	Мережа живить навантаження через вузол стабілізації, накопичувач вмикається при аварії	Помірна ціна, стабілізація напруги, менше використання накопичувача	Можлива мала затримка, складніший за Off-line	Приймається як базове рішення
Подвійного перетворення On-line / VFI	Вхідна енергія постійно перетворюється у постійну і знову у змінну	Найвища якість напруги, нульовий час переходу	Вища ціна, більші втрати, нагрів	Технічно можливий, але надмірно складний для заданої ролі

1.3. Порівняння акумуляторних і кінетичних накопичувачів енергії

Найбільш поширеним способом накопичення енергії у ДБЖ є хімічні акумуляторні батареї. Їх застосовують у малих і середніх системах, оскільки вони доступні, мають відносно високу енергоємність і розвинену виробничу базу.

Основні обмеження батарейних ДБЖ такі:

- обмежена кількість циклів заряду і розряду;
- залежність ресурсу від температури та глибини розряду;
- поступова втрата ємності під час експлуатації;
- потреба у контролі заряджання і технічного стану батареї;
- складність утилізації відпрацьованих акумуляторів.

Для режиму багаторазових коротких включень ці недоліки є помітними, оскільки накопичувач часто працює у перехідних режимах.

Альтернативною електрохімічним батареям є маховикові накопичувачі, у яких енергія зберігається у вигляді кінетичної енергії обертання ротора [4]. Принцип роботи можна подати у такій послідовності:

1. Під час наявності напруги мережі електрична машина працює як двигун і розганяє ротор.
2. Після досягнення робочої швидкості система підтримує оберти та компенсує втрати в опорах і електромагнітній частині.
3. При зникненні мережі електрична машина переходить у генераторний режим.
4. Кінетична енергія ротора завдяки генератору перетворюється у електричну.

Маховикові накопичувачі мають перевагу у високій питомій потужності, швидкому заряджанні, швидкому розряджанні, великій кількості циклів і прогнозованості деградації. Вони добре підходять для систем, де потрібне короткочасне резервування, згладжування пікових навантажень, компенсація провалів напруги, рекуперація енергії гальмування або стабілізація частоти. У порівнянні з хімічними батареями маховик не потребує електрохімічних реакцій, менше залежить від кількості циклів і краще витримує часті перехідні процеси [4].

Основними обмеженнями кінетичних накопичувачів є саморозряд через механічні та аеродинамічні втрати, вимоги до балансування, небезпека руйнування ротора при перевищенні допустимих напружень, потреба у надійному корпусі та складніша система керування. Для зменшення втрат високошвидкісні маховики часто розміщують у вакуумній камері та встановлюють на спеціальних опорах. У низько- та середньошвидкісних конструкціях можуть застосовуватися підшипники кочення, що спрощує виготовлення, але збільшує втрати та знос у порівнянні з магнітними опорами [5].

Для заданого ДБЖ час автономної роботи становить 4 хв, тому технологія накопичення кінетичної енергії є технічно обґрунтованою. Установка не повинна зберігати енергію протягом багатьох годин без втрат, а має забезпечити короткий проміжок автономії з високою готовністю. Вибір маховикового накопичувача

						Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

також узгоджується з прототипом, зазначеним у завданні, де передбачено використання технології накопичення кінетичної енергії. Надалі необхідно оцінити конструкцію ротора, підшипників, матеріалів і системи керування, оскільки від них залежить можливість забезпечення потужності 800 Вт у межах заданих габаритів (табл. 1.2) [2].

Таблиця 1.2 - Порівняння електрохімічного та кінетичного накопичення енергії

Критерій	Акумуляторна батарея	Акумулятор кінетичної енергії
Принцип накопичення	Електрохімічні реакції	Кінетична енергія обертання ротора
Питома енергія	Вища для довготривалого живлення	Нижча у простих металевих системах
Питома потужність	Обмежена струмами заряду і розряду	Висока, придатна для коротких імпульсів
Циклічна довговічність	Обмежена деградацією батареї	Дуже висока за умови справних опор
Саморозряд	Порівняно малий	Залежить від втрат в опорах і середовищі
Обслуговування	Контроль ємності, температури, стану батареї	Контроль швидкості, вібрації, опор, корпусу
Доцільність у проєкті	Може забезпечити живлення, але не відповідає темі	Обирається як основний накопичувач

Ротор є основним елементом акумулятора кінетичної енергії, оскільки в ньому зосереджується запас механічної енергії. За конструктивним виконанням доцільно розглядати кілька варіантів [6]:

1. Суцільний дисковий ротор.
2. Кільцевий ротор або обід.
3. Багатодискова система.
4. Складений або композитний ротор.

Вибір форми пов'язаний з моментом інерції, допустимою частотою обертання, технологією виготовлення, балансуванням і характером можливого руйнування.

Суцільний диск простий у виготовленні, має добру жорсткість і зручний для розрахунків. Його недоліком є менша ефективність використання маси порівняно з тонким ободом, оскільки частина матеріалу розташована ближче до осі та створює менший внесок у момент інерції. Обід або кільцевий ротор краще накопичує енергію за протезової маси, адже більша частина матеріалу віддалена від осі. Проте кільцеві ротори складніші щодо міцності, кріплення, балансування та захисту від руйнування при високих швидкостях [6].

Багатодискова конструкція дає змогу розподілити масу ротора між кількома елементами, зменшити товщину окремих дисків, спростити виготовлення, покращити ремонтпридатність і частково керувати напружено-деформованим станом. У патентних рішеннях щодо акумуляторів кінетичної енергії застосовуються диски, жорстко пов'язані з валом, а також електричні машини, які працюють як двигун під час розгону та як генератор під час відбору енергії [2].

У проєктованій системі габарит 430 мм обмежує максимальний діаметр ротора і корпусу. Через це недоцільно застосовувати великі ободи або складні композитні оболонки без належного технологічного забезпечення. Раціональним рішенням є металевий дисковий ротор на багатоступінчастому валу з можливістю встановлення підшипникових опор та електромеханічних елементів. Обрана схема придатна для подальшого розрахунку інерційних властивостей, міцності валу, підбору підшипників і створення складального креслення.

Міцність ротора визначається напруженнями від відцентрових сил, які зростають зі збільшенням кутової швидкості. Кінетична енергія залежить від швидкості обертання квадратично, однак підвищення обертів обмежується допустимими напруженнями матеріалу, точністю балансування та вимогами безпеки. Для сталевих роторів допустима швидкість нижча, ніж для композитних, проте сталь має велику щільність, доступність, просту механічну обробку та передбачувану поведінку під час виготовлення [6].

						Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У акумуляторі кінетичної енергії накопичення та зберігання енергії відбувається у вигляді кінетичної енергії обертання маховика, а її подальше використання здійснюється через перетворення в механічну енергію обертання [4].

Конструктивно акумулятор кінетичної енергії виконано у вигляді металевого диска 1, на осі якого з обох боків розміщені ротори з короткозамкненими обмотками 2. Діаметр диска більш ніж у десять разів перевищує діаметр роторів. Конструкція розташована у вакуумному корпусі 3, закріпленому з можливістю вільного обертання в будь-якій площині, що зменшує інерційні навантаження. На валу 6 встановлені диски 7, жорстко з'єднані з ним, а сам вал має ступінчасту будову. У проміжках між дисками розміщені кулькові підшипники 8, які виконують функцію опор для роторів. Тіла кочення 9, виготовлені з надтвердих матеріалів, взаємодіють зі спеціальними проточками на поверхні валу. Усередині корпусу навпроти роторів розташовані статори 4. Для керування обмотками статорів передбачено датчики кута повороту роторів 5, що сприяє зниженню енергетичних втрат (рис. 1.1) [2; 5].

						Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

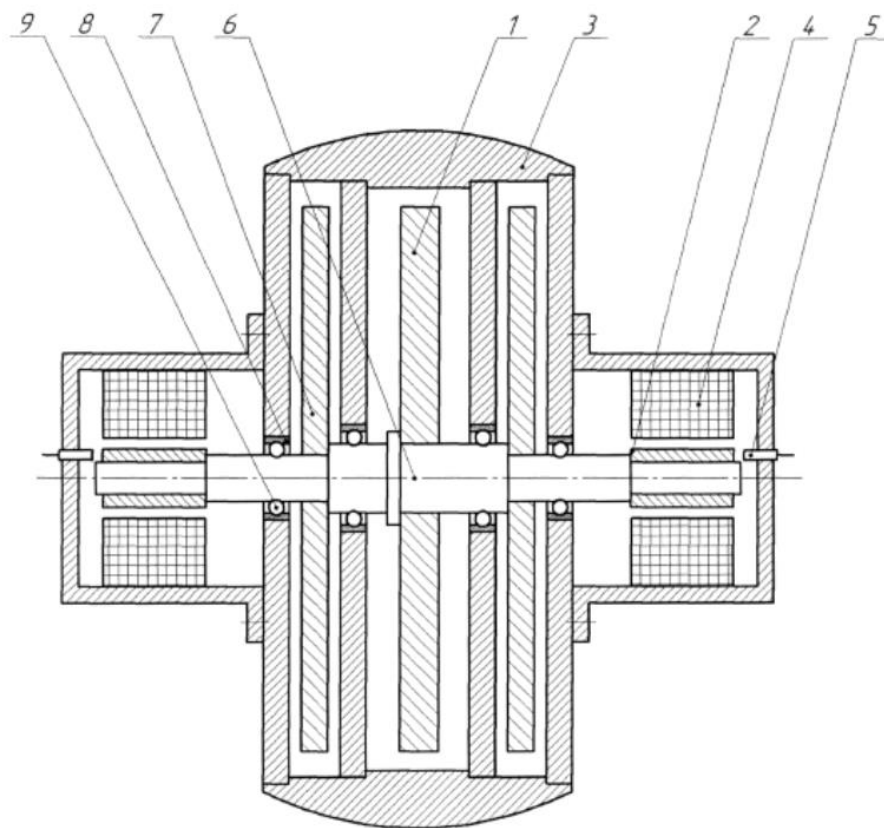


Рисунок 1.1 – Ескізне креслення акумулятора кінетичної енергії [5]

Для вибору раціональної конструкції ротора доцільно порівняти кілька можливих варіантів за технологічністю виготовлення, міцністю, моментом інерції, ремонтпридатністю та придатністю для заданих габаритів ДБЖ. Порівняльна оцінка конструктивних рішень наведена в табл. 1.3.

За результатами порівняння найбільш придатною для проєктованого ДБЖ є багатодискова система. Вона забезпечує зручне компонування ротора, дає змогу розподілити масу між кількома елементами та спрощує подальший розрахунок валу, підшипникових опор і складального вузла. Композитний ротор має кращі енергетичні характеристики, проте його застосування у межах проєкту ускладнюється високою вартістю та складною технологією виготовлення.

Таблиця 1.3 - Оцінка конструктивних варіантів ротора

Варіант ротора	Переваги	Обмеження	Оцінка для заданого ДБЖ
Суцільний диск	Просте виготовлення, жорсткість, зручність розрахунку	Менше використання маси для моменту інерції	Може бути застосований як базовий елемент
Кільцевий обід	Високий момент інерції при тій самій масі	Складніше кріплення, вищі вимоги до міцності	Доцільний для промислових оптимізованих систем
Багатодискова система	Зручність компонування, ремонтпридатність, розподіл маси	Потрібна точна співвісність і балансування	Найбільш придатна для проекту
Композитний ротор	Висока питома енергія, менша маса	Висока ціна, складна технологія	Не приймається як основний через складність

Опори ротора визначають втрати енергії, ресурс, рівень шуму, точність обертання та безпечність роботи накопичувача. У маховикових системах можуть використовуватися підшипники кочення, підшипники ковзання, газодинамічні, гідродинамічні та магнітні опори. Високошвидкісні промислові накопичувачі часто застосовують магнітні опори, оскільки вони зменшують контактне тертя і знос. Проте магнітні системи потребують складного керування, датчиків положення, силової електроніки та аварійних підшипників. Для установки навчального рівня з помірною складністю доцільно розглядати механічні підшипники кочення [7].

Підшипники кочення мають відносно малі втрати на тертя, високу несучу здатність, стандартизовані розміри, доступність і зручність монтажу. Їхні основні переваги можна подати так [7]:

- малі втрати на тертя та високий ККД опор;
- достатня несуча здатність для компактних вузлів;
- стандартні типорозміри і доступність підбору;

- невеликі витрати мастильних матеріалів;
- простіший монтаж у порівнянні зі складними магнітними або газовими опорами.

Недоліки підшипників кочення також мають бути враховані:

- обмежений строк служби при великих швидкостях і навантаженнях;
- чутливість до ударних навантажень та дисбалансу;
- підвищений шум на високих обертах;
- потреба у точному монтажі та контролі температури.

Підшипники кочення для такої системи можна класифікувати за кількома ознаками [8]:

1. За формою тіл кочення - кулькові та роликові.
2. За числом рядів - однорядні, дворядні та багаторядні.
3. За здатністю компенсувати перекіс - несамоустановні та самоустановні.
4. За напрямом сприйняття навантаження - радіальні, упорні та радіально-упорні.

Для компактного маховикового накопичувача перевага надається кульковим підшипникам, оскільки вони мають менше тертя і краще підходять для порівняно високих швидкостей.

За напрямом сприйняття навантаження підшипники поділяються на радіальні, упорні, радіально-упорні та упорно-радіальні. У розглянутій конструкції основним є радіальне навантаження від маси ротора, дисбалансу та сил, що виникають під час обертання. Осьові сили можуть бути обмеженими за умови правильної компоновки електромашинних елементів і симетричного розташування деталей. Тому основними опорами доцільно прийняти радіальні кулькові підшипники, а потребу в осьовій фіксації врахувати конструктивно за допомогою посадок, буртиків, гайок або додаткових елементів (табл. 1.4) [7].

Самоустановні сферичні підшипники можуть компенсувати перекоси вала, проте вони мають більші габарити й не завжди доцільні для компактної конструкції. Несамоустановні однорядні радіальні кулькові підшипники простіші, дешевші та технологічніші. За умови достатньої точності виготовлення вала,

						Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

посадочних місць і корпусу вони забезпечують потрібну працездатність. Для подальших розрахунків вибір однорядних радіальних кулькових підшипників є обґрунтованим, оскільки він відповідає вимогам компактності, доступності та можливості стандартного підбору [7].

Таблиця 1.4 - Порівняння типів опор для ротора накопичувача

Тип опор	Переваги	Недоліки	Висновок
Підшипники кочення	Доступність, стандартизація, малі втрати, простий монтаж	Знос, шум, обмеження швидкості	Приймаються для проєкту
Підшипники ковзання	Можуть сприймати значні навантаження	Потребують мастила, мають більші втрати при пуску	Не є основним варіантом
Магнітні опори	Малі контактні втрати, високий ресурс	Складне керування, висока ціна	Доцільні для складних промислових систем
Газові або гідродинамічні опори	Малі втрати у робочому режимі	Складність реалізації та пускових режимів	Не обираються для навчального проєкту

1.4. Матеріали основних деталей накопичувача

Матеріал ротора, валу, корпусу та підшипникових елементів визначає міцність, масу, технологічність, вартість і безпечність маховикового накопичувача. Під час попереднього вибору враховують такі показники:

- границю міцності та границю плинності;
- густину матеріалу і вплив маси на інерційні властивості;
- втомну довговічність;
- оброблюваність і можливість термічної обробки;
- поведінку деталі у разі аварійного руйнування.

Для подальших розрахунків важливо, щоб матеріали мали довідкові механічні характеристики та були доступні для стандартної механічної обробки [9].

Сталі залишаються найпоширенішими матеріалами для валів, корпусів і дисків у машинобудуванні. Їх перевагами є доступність, передбачувані механічні властивості, можливість термічної обробки, добра оброблюваність і наявність нормативно-довідкової бази для розрахунків. Недоліком сталі як матеріалу ротора є відносно висока густина, що обмежує максимально допустиму швидкість при заданих напруженнях. Проте для конструкції помірної швидкості з навчально-проектним розрахунком сталь є виправданим вибором [6].

Сталь 40X доцільно застосовувати для валу та дисків, оскільки вона належить до конструкційних легованих сталей і може забезпечувати достатню міцність після відповідної термічної обробки. Для валу важливим є через поєднання згину, кручення, контактних напружень у посадочних місцях і вимог до точності обертання. Для дисків сталь 40X дає можливість отримати міцну деталь, придатну до токарної та фрезерної обробки. Остаточні допустимі напруження мають бути визначені в розрахунковому розділі з урахуванням стану поставки, термообробки та коефіцієнта запасу [6].

Сталь 20 може бути використана для корпусу або елементів кожуха, оскільки вона добре зварюється, обробляється і підходить для виготовлення деталей, де головними є технологічність та достатня конструкційна міцність. Корпус маховикового накопичувача не лише утримує елементи, а й виконує захисну функцію. Тому його товщина, форма, ребра жорсткості та внутрішній захисний шар мають розглядатися в розрахунках безпеки [10].

Сталь ШХ15 традиційно застосовується для тіл кочення та кілець підшипників завдяки високій твердості, зносостійкості й контактній витривалості після термообробки. Оскільки у проєкті підшипники вибираються як стандартні вироби, матеріал ШХ15 важливий як довідкова характеристика для пояснення працездатності опор, а не як об'єкт самостійного виготовлення. Для захисного шару корпусу доцільно передбачити кевлар або інший енергоємний волокнистий

						Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

матеріал, здатний поглинати частину енергії уламків при аварійному руйнуванні ротора.

Таблиця 1.5 - Попередній вибір матеріалів деталей

Деталь	Прийнятий матеріал	Причина вибору
Диски ротора	Сталь 40Х	Міцність, оброблюваність, можливість термообробки
Багатоступінчастий вал	Сталь 40Х	Сприйняття згину, кручення і посадочних навантажень
Корпус	Сталь 20	Зварюваність, технологічність, достатня жорсткість
Підшипникові елементи	Сталь ШХ15	Контактна міцність і зносостійкість стандартних підшипників
Внутрішній захист корпусу	Кевлар	Поглинання енергії уламків і підвищення безпеки

Композитні матеріали, вуглецеве волокно, мають дуже високе відношення міцності до маси та дають змогу створювати високошвидкісні ротори з великою питомою енергоємністю. Проте вони дорожчі, складніші у виготовленні, потребують спеціальної технології намотування, контролю дефектів і складнішого розрахунку анізотропних властивостей. Для проекту композитний ротор не обирається як основний, але аналіз його переваг підтверджує, що у промислових високошвидкісних маховиках перехід від сталі до композитів є одним із шляхів підвищення енергоємності (1.5) [11].

При проектуванні накопичувача кінетичної енергії необхідно також врахувати вимоги до точності виготовлення циліндричних поверхонь [12], що висуваються до валу та маховика, що накладають обмеження по рівню вібрацій усієї системи, що будуть виникати при обертанні ротору із високою кутовою швидкістю.

1.5. Кінематична, електромеханічна схема та система керування ДБЖ з маховиковим накопичувачем

Кінематична схема ДБЖ з накопиченням кінетичної енергії має забезпечувати двонаправлене перетворення енергії. Роботу системи можна подати у вигляді послідовності:

1. Мережа живить навантаження і одночасно підтримує ротор у зарядженому стані.
2. Електрична машина працює як двигун та компенсує втрати обертання.
3. При зникненні мережі електрична машина переходить у генераторний режим.
4. Енергія ротора через силовий перетворювач подається на навантаження.
5. Після появи стабільного резервного живлення ротор знову розганяється до робочої швидкості.

У схемі з одним електромашинним вузлом двигун і генератор можуть бути реалізовані в одній машині. Обраний підхід зменшує габарити, кількість деталей і втрати на механічну передачу. Альтернативою є окремий двигун для розгону і генератор для відбору енергії, але ця схема ускладнює конструкцію, збільшує довжину валу та потребує узгодження двох машин. Для компактного виробу в межах 430 мм доцільніше обирати інтегроване електромеханічне рішення або конструкцію з симетричним розміщенням роторів і статорів, відповідно до підходу, передбаченого у патентних рішеннях щодо акумуляторів кінетичної енергії (2).

Механічна передача між ротором і електричною машиною в ідеальному варіанті має бути відсутньою або мінімальною. Зубчасті передачі, паси чи муфти збільшують втрати, шум, потребу у мастилі та ймовірність відмови. Оскільки маховик працює з високою частотою обертання, додаткові передачі ускладнюють балансування. Тому раціонально розташувати ротор накопичувача і активні елементи електричної машини на спільному валу, забезпечивши передачу енергії без проміжних механізмів.

						Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У складі системи з бензиновим генератором ДБЖ виконує роль швидкодіючого буфера. При нормальному живленні навантаження отримує енергію від мережі, а маховик підтримується у зарядженому стані. При втраті мережі ДБЖ переходить на автономне живлення. Паралельно система може подати сигнал на запуск бензинового генератора. Після виходу генератора на стабільні 220 В і 50 Гц навантаження переводиться на генератор, а маховик поступово відновлює запас енергії. Обраний алгоритм зменшує вимоги до довготривалої автономності маховика, але підвищує вимоги до швидкості реагування системи керування.

З огляду на потужність 800 Вт силова частина може бути реалізована на базі випрямляча, інвертора, ланки постійного струму, контролера обертів та комутаційних елементів. У нормальному режимі ланка постійного струму забезпечує кероване живлення електричної машини, а у генераторному режимі приймає енергію від неї і формує стабільну вихідну напругу. Важливими є захист від перенапруги, обмеження струму, контроль температури, контроль швидкості ротора і аварійне відключення при перевищенні допустимих параметрів.

Система керування ДБЖ з маховиковим накопичувачем повинна виконувати функції моніторингу, регулювання, комутації та захисту. На відміну від простого батарейного ДБЖ, де основним параметром є напруга акумулятора, у кінетичній системі необхідно постійно контролювати швидкість ротора, напрям енергетичного потоку, температуру, вібрацію, стан підшипників, параметри мережі та вихідну напругу. Надійність системи керування безпосередньо впливає на безпечність, оскільки ротор накопичує значний запас механічної енергії [2].

У нормальному режимі контролер порівнює напругу мережі з допустимими межами, підтримує заряд накопичувача та керує електричною машиною в режимі двигуна. Після досягнення заданої швидкості система не повинна постійно прискорювати ротор, а має лише компенсувати втрати. Режим підтримання зменшує нагрів, енергоспоживання та зношування опор. При відхиленні мережі контролер переводить силову частину в автономний режим і забезпечує

						Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підтримання вихідної напруги до моменту розряду маховика або підключення резервного генератора.

Для визначення стану накопичувача потрібен датчик швидкості або датчик положення ротора. У патентних рішеннях передбачено датчики кута повороту роторів, які забезпечують керування обмотками статорів і зменшення енергетичних втрат [5]. У сучасній реалізації функцію контролю може виконувати енкодер, датчик Холла, індуктивний датчик або бездатчиковий алгоритм за електричними параметрами машини, достатньо передбачити датчик швидкості обертання та датчики температури опор і силових електронних елементів.

Система керування повинна мати кілька рівнів захисту. Для проєктованого ДБЖ доцільно передбачити такі контрольні пороги:

1. Попереджувальний поріг за швидкістю ротора, коли запас енергії зменшується.
2. Поріг аварійного відключення навантаження при неможливості підтримувати вихідну напругу.
3. Поріг перевищення допустимої швидкості ротора.
4. Поріг перегріву підшипників або силових електронних елементів.
5. Поріг надмірної вібрації, який може свідчити про дисбаланс або пошкодження. (табл. 1.6).

Такий поділ потрібен для реагування не лише на аварію, а й на передаварійний стан.

У складі лінійно-інтерактивної архітектури контролер також керує стабілізацією напруги від мережі. Якщо мережа присутня, але має помірні відхилення, доцільно не розряджати маховик, а компенсувати відхилення регулятором напруги. Перехід на накопичувач має відбуватися при зникненні мережі, глибокому провалі, значній перенапрузі або нестабільній частоті. Режим підтримання зменшує кількість циклів повного відбору енергії та підвищує ресурс механічної частини.

						Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.6 - Основні контрольовані параметри системи керування

Параметр	Призначення контролю	Можлива реакція системи
Вхідна напруга	Визначення стану мережі	Стабілізація або перехід на автономний режим
Вихідна напруга	Підтримання якості живлення навантаження	Регулювання інвертора, аварійне відключення
Швидкість ротора	Оцінка запасу кінетичної енергії	Заряджання, обмеження швидкості, попередження
Температура підшипників	Запобігання перегріву та руйнуванню опор	Зниження навантаження або зупинка
Вібрація	Виявлення дисбалансу або пошкодження	Аварійне гальмування чи вимкнення
Струм навантаження	Захист від перевантаження і КЗ	Обмеження струму, відключення виходу

1.6. Технічні рішення та вибір остаточного схемного рішення

Результати практичного впровадження патенту України на корисну модель № 112759 підтверджують можливість використання запропонованої схеми у якості ефективного та автономного накопичувача, здатного приймати й віддавати енергію в електромеханічній системі. Подібні рішення спрямовані на зменшення втрат, підвищення ресурсу, стабілізацію ротора та безпеку роботи накопичувача [2].

Патент України № 136897 безпосередньо стосується акумулятора кінетичної енергії. У ньому подано конструкцію з металевим диском, роторами з короткозамкненими обмотками, статорами, вакуумним корпусом, підшипниковими опорами та датчиками кута повороту [5].

Технічно доцільним є розміщення електромеханічних елементів на осі маховика. Така схема зменшує кількість проміжних вузлів, скорочує втрати та спрощує передавання енергії від мережі до ротора і від ротора до навантаження. Водночас конструкція потребує точного балансування, міцного корпусу, надійних опор і узгодженої роботи системи керування [5].

Сучасні системи flywheel energy storage розвиваються в напрямі підвищення швидкості обертання, застосування композитних роторів, вакуумних корпусів, магнітних підшипників, силової електроніки та діагностики [11]. Для проєкту з потужністю 800 Вт, автономною роботою 4 хв і габаритом 430 мм недоцільно приймати складну високошвидкісну композитну систему. Рациональним рішенням є металева маховикова система з дисковим або багатодисковим ротором на сталевому валу, стандартними підшипниками, захисним корпусом і керованою електричною машиною.

Вибір схеми виконується за критеріями потужності, автономності, компактності, технологічності, надійності, безпеки, вартості та придатності до розрахунків. Хімічна батарея простіша в електричній частині, однак не відповідає темі проєкту й поступається маховику за циклічною довговічністю при короткочасних включеннях. Високошвидкісний композитний маховик має кращу питому енергоємність, але потребує дорогих матеріалів, складних опор і спеціальної технології виготовлення.

За архітектурою ДБЖ приймається лінійно-інтерактивна схема. Вона забезпечує регулювання напруги в нормальному режимі, зменшує кількість переходів на накопичувач і є простішою за систему подвійного перетворення. Резервна схема має нижчий рівень стабілізації, через що менш придатна для роботи з нестабільною мережею [1; 12].

Як накопичувач енергії приймається акумулятор кінетичної енергії. Для потужності 800 Вт і часу автономної роботи 4 хв він має забезпечити не менше 192 кДж корисної енергії без урахування втрат. Фактичний запас енергії приймається з резервом, а остаточні параметри ротора визначаються за моментом інерції, допустимою швидкістю обертання та міцністю матеріалу.

Конструктивно приймається сталевий дисковий або багатодисковий ротор на багатоступінчастому валу. Електромеханічний вузол працює в режимах двигуна під час розгону та генератора під час віддавання енергії. Механічна передача між накопичувачем і електричною машиною не застосовується, оскільки спільний вал зменшує втрати й спрощує конструювання.

						Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Опорами валу обрано однорядні радіальні кулькові підшипники. Вони стандартизовані, доступні, компактні та придатні для роботи за переважно радіального навантаження. Остаточний типорозмір підшипників визначається в розрахунковому розділі за навантаженням, ресурсом, частотою обертання та посадочними розмірами (табл. 1.7) [7].

Таблиця 1.7 - Підсумкова оцінка прийнятого схемного рішення

Елемент вибору	Прийнятий варіант	Обґрунтування
Архітектура ДБЖ	Лінійно-інтерактивна	Компроміс між якістю живлення, ККД, ціною та складністю
Накопичувач	Кінетичний маховиковий	Висока циклічна довговічність і швидке віддавання енергії
Ротор	Сталевий дисковий або багатодисковий	Технологічність і можливість розрахунку міцності
Опори	Однорядні радіальні кулькові підшипники	Доступність, компактність, малі втрати на тертя
Корпус	Сталь 20 із внутрішнім захисним шаром	Несуча і захисна функції
Керування	Контроль мережі, швидкості, температури, вібрації	Безпечний перехід між режимами та захист

Матеріали приймаються з урахуванням міцності, доступності й технологічності. Для дисків і вала доцільна сталь 40Х, для корпусу - сталь 20, для підшипників - стандартна підшипникова сталь ШХ15, для внутрішнього захисного шару - кевлар. Таке поєднання забезпечує міцність механічної частини, технологічність корпусу, надійність опор і додатковий захист при аварійному руйнуванні ротора.

Система керування має контролювати напругу мережі, вихідну напругу, швидкість обертання ротора, температуру, струм навантаження та аварійні стани. У нормальному режимі вона підтримує запас кінетичної енергії, при зникненні або критичному відхиленні напруги переводить електричну машину в генераторний режим, а після появи стабільного живлення забезпечує повернення до заряджання.

Остаточне схемне рішення передбачає лінійно-інтерактивне ДБЖ з маховиковим накопичувачем, що також може працювати у режимі подвійного перетворення зі сталевим багатодисковим ротором на багатоступінчастому валу, радіальними кульковими підшипниками, металевим захисним корпусом із внутрішнім кевларовим шаром, електричним мотор-генератором і системою керування. Прийнята схема відповідає заданим параметрам і може бути обґрунтована подальшими розрахунками інерційних властивостей, міцності, підшипникових опор, корпусу та режимів роботи.

Висновки до розділу 1

У першому розділі проаналізовано призначення джерел безперебійного живлення, умови застосування резервних систем і вимоги до проєктованого ДБЖ потужністю 800 Вт. Встановлено, що при автономній роботі протягом 4 хв корисна енергія, яку необхідно передати навантаженню, становить 192 кДж без урахування втрат. Тому накопичувач має розглядатися як короткочасний буфер, призначений для перекриття перехідного періоду між зникненням напруги у мережі та підключенням стабільного резервного джерела.

Порівняння архітектур Off-line, Line-interactive та On-line показало, що для заданої системи найдоцільнішою є лінійно-інтерактивна схема. Вона забезпечує стабілізацію напруги при роботі від мережі, зменшує кількість переходів на накопичувач і не потребує постійного подвійного перетворення всієї енергії. Обраний варіант відповідає вимогам помірної вартості, достатньої якості живлення та прийнятного ККД.

						Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналіз електрохімічного та кінетичного накопичення енергії підтвердив доцільність використання акумулятора кінетичної енергії. Маховик має високу пікову потужність, швидко заряджається і розряджається, витримує багато циклів та добре підходить для короткочасного резервування. Обмеження у вигляді втрат, вимог до балансування, опор і захисного корпусу мають бути враховані в конструкторському та розрахунковому розділах.

Для подальшого проектування прийнято конструкцію з металевим багатодисковим ротором на багатоступінчастому валу. Як матеріал дисків і валу обрано сталь 40Х, для корпусу - сталь 20, для підшипникових елементів - стандартну підшипникову сталь ШХ15, а для внутрішнього захисного шару корпусу - кевлар. Опорами прийнято однорядні радіальні кулькові підшипники, оскільки вони компактні, доступні.

Остаточне схемне рішення передбачає лінійно-інтерактивне джерело безперебійного живлення, що також може працювати у режимі подвійного перетворення з маховиковим накопичувачем та мотор-генератором.

						Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ НАКОПИЧУВАЧА КІНЕТИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ, РОЗРАХУНОК ВАЛУ ТА ПІДШИПНИКІВ, ПІДБІР КОМПЛЕКТУЮЧИХ

2.1. Опис системи накопичення кінетичної енергії та обґрунтування конструктивного рішення

Накопичувач кінетичної енергії необхідний для забезпечення короткочасної роботи електронного обладнання під час непрогнозованого відключення електроенергії. У момент від відключення енергії до початку роботи бензинового або дизельного генератора електронне обладнання залишається без живлення, що може призвести до виходу його із ладу обладнання або втрати даних. У цей час вступає в роботу накопичувач кінетичної енергії, що керується від однієї системи управління із генератором. Можливість роботи накопичувача в режимі подвійного перетворення дозволяє також захистити обладнання від стрибків напруги у мережі.

Накопичувач кінетичної енергії (рис. 2.1) складається з двох дисків 6 і 7, що розміщені у металевому корпусі 8, встановлені на валу 5, що має ступінчасту конструкцію. Уся конструкція розміщена у герметичному корпусі 15. На обох кінцях валу через муфти 3 і 4 встановлені електромотор 1 та електрогенератор 2. Опорами слугують підшипники 9, 10 і 11, що не містять внутрішніх кілець, натомість тіла кочення взаємодіють із проточками на поверхні валу відповідної форми. Додатково в системі встановлено датчик швидкості обертання 12, датчик вібрацій 13 та датчик тиску 14. У системі передбачена пневматична лінія 16, та розподільник з ручним керуванням Р1. Пневматична лінія дозволяє сполучати герметичну порожнину із вакуум-насосом для створення вакууму усередині герметичної камери, або із джерелом газу.

						Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

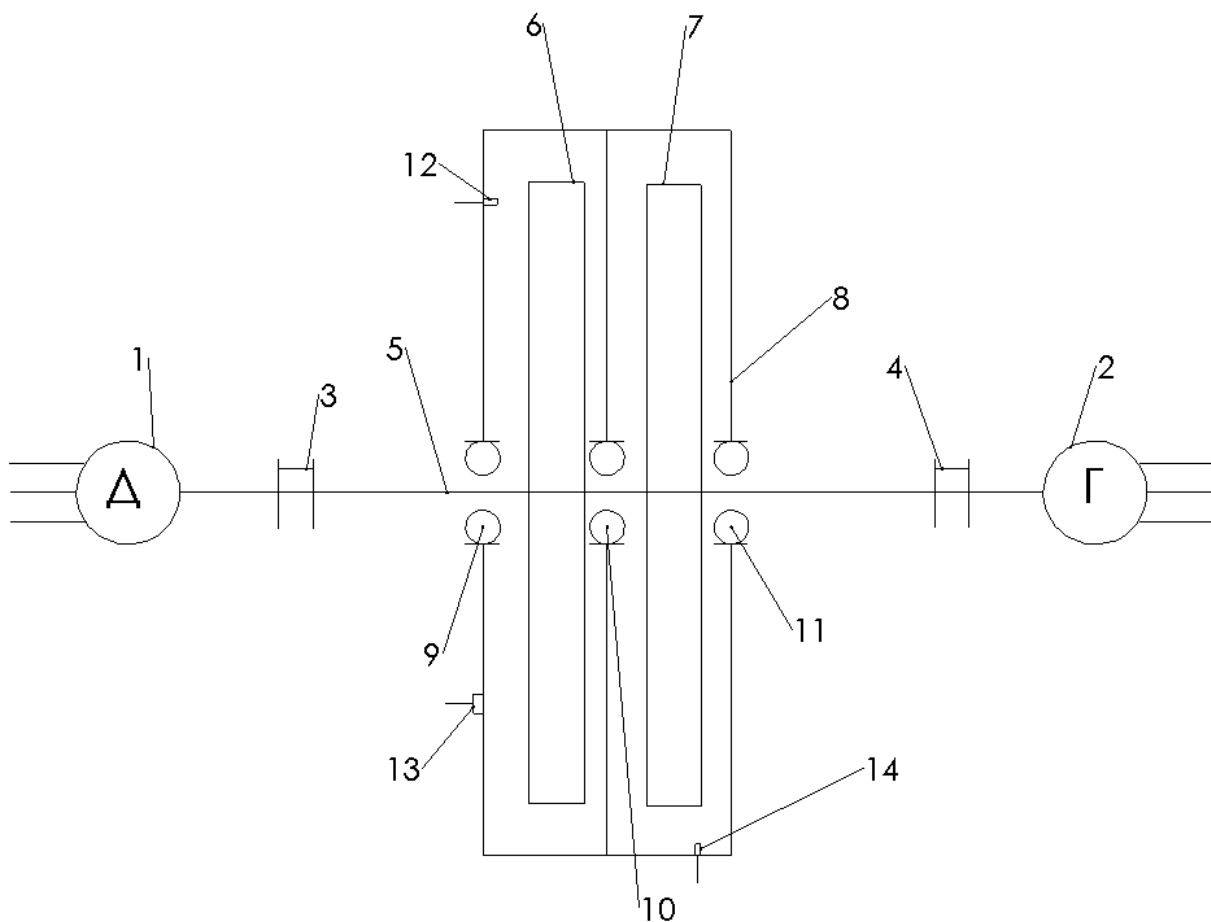


Рис. 2.1 - Принципова схема накопичувача кінетичної енергії

Кількість дисків було обрано для забезпечення оптимального відношення розмірів дисків та ККД. Конструкція з одним маховиком має більші втрати потужності у підшипниках, а також більші деформації валу при роботі, що погіршує динамічні характеристики ротора. Окрім того, використання двох або більшої кількості маховиків полегшує процес балансування кожного з них та ротора вцілому. Збільшення кількості маховиків, хоча і зменшить навантаження на вал, але також збільшить кількість підшипників, що призведе до зменшення ККД. Отже конструкція, що складається з двох дисків є оптимальною.

Для зменшення діаметру підшипників, що визначає момент опору та втрати енергії на механічне тертя на поверхні валу робляться спеціальні проточки, з якими будуть взаємодіяти тіла кочення підшипників.

Внаслідок використання високообертового ротору стають суттєвими сили аеродинамічного опору, що збільшує втрати енергії. Доцільно розмістити ротори

						Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

у герметичному вакуумному корпусі, використовуючи замість повітря легкий газ (гелій). Заповнення порожнини гелієм або зниження тиску в ній дозволяє знизити сили аеродинамічного опору, що виникають при обертанні маховика із високою окружною швидкістю, що в свою чергу дозволяє підвищити енергоефективність установки та знизити інтенсивність окислюваних процесів у підшипникових вузлах та механічних деталях пристрою. Для контролю за тиском усередині корпусу встановлено датчик тиску.

Для контролю за швидкістю обертання роторів встановлено датчик швидкості обертання, що дозволяє моніторити поточну частоту обертання та мати інформацію про накопичену на поточний момент часу кінетичну енергію.

Також датчик частоти обертання дозволяє визначати поточне напруцювання накопичувача енергії та його залишковий ресурс. Після досягнення значення напруцювання, що складає 17,5 тис. годин (2 роки неперервної роботи) накопичувач потребує проведення технічного обслуговування, що включає заміну підшипників.

Для підвищення безпеки встановлено датчик вібрацій. При наближенні показників вібрацій до рівня, що перевищує допустиму величину, система аварійно відключає накопичувач кінетичної енергії.

2.2. Розрахунок основних параметрів накопичувача кінетичної енергії

2.2.1. Постановка задачі

Основними параметрами накопичувача кінетичної енергії, які необхідно розрахувати, це: кутова швидкість обертання, розміри маховика/маховиків, величину моменту інерції маховика/маховиків, масу маховика/маховиків.

В завданні задано такі параметри:

- Потужність $P = 800 \text{ Вт}$
- Час автономної роботи $t = 4 \text{ хв} = 240 \text{ с}$
- Орієнтовні габарити: 430 (Д) · 430 (Ш) · 430 (В)

						Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для спрощення розрахунку спочатку розраховуємо спрощену схему накопичувача кінетичної енергії: приймаємо для дисків маховиків форму товстостінного циліндра.

2.2.2. Попередній розрахунок параметрів спрощеної схеми накопичувача кінетичної енергії

Радіус визначимо виходячи з орієнтовних габаритів. Оскільки у схемі диски розташовані вертикально, радіус визначає висота джерела безперебійного живлення.

Потрібно врахувати товщину стінки корпусу та простір між стінкою корпусу та диском. Приймаємо запас 35 мм з кожної сторони диску.

Отже приймаємо зовнішній радіус $r_2 = 180$ мм та внутрішній радіус $r_1 = 120$ мм.

Значення кутової швидкості залежить від максимальної напруженості матеріалу та радіусу диску.

Величина напруження розраховується за формулою [9]:

$$\sigma_{\theta max} = c[2 + (1 - m)k^2] \leq [\sigma]$$

$$\text{де } c = \frac{3+\mu}{8} \frac{\gamma}{g} \omega^2 r_2^2; m = \frac{1+3\mu}{3+\mu}; k = \frac{r_1}{r_2}; g = 9,8 \text{ м/с}^2;$$

μ – коефіцієнт Пуассона (для металів $\mu \approx 0,3$);

γ – питома вага матеріалу, $\frac{\text{Н}}{\text{м}^3}$ (для сталі 40Х $\gamma \approx 76,7 \frac{\text{кН}}{\text{м}^3}$ [17]);

ω – кутова швидкість, рад/с;

$[\sigma]$ – допустиме напруження, МПа;

r_1 – внутрішній радіус;

r_2 – зовнішній радіус.

Підставляємо коефіцієнти:

$$\sigma_{\theta max} = \frac{3 + \mu}{8} \frac{\gamma}{g} \omega^2 r_2^2 \left[2 + \left(1 - \frac{1 + 3\mu}{3 + \mu} \right) \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right] \leq [\sigma]$$

Допустиме напруження для сталі отримуємо за формулою:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_T}{n}$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

де σ_T – границя текучості; n – коефіцієнт запасу міцності.

Границя текучості σ_T сталі 40Х становить 720 МПа [13]. Коефіцієнт запасу міцності беремо $n = 2$.

Отже:

$$[\sigma] = \frac{720}{2} = 360 \text{ МПа}$$

Розраховуємо значення кутової швидкості за формулою:

$$\omega = \sqrt{\frac{8[\sigma]g}{(3+\mu)\gamma r_2^2 \left[2 + \left(1 - \frac{1+3\mu}{3+\mu} \right) \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right]}} = \frac{1}{r_2} \sqrt{\frac{8[\sigma]g}{(3+\mu)\gamma \left[2 + \left(1 - \frac{1+3\mu}{3+\mu} \right) \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right]}}$$
$$\omega = \frac{1}{0,180} \sqrt{\frac{8 \cdot 360 \cdot 10^6 \cdot 9,81}{(3+0,3) \cdot 76,7 \cdot 10^3 \cdot \left[2 + \left(1 - \frac{1+3 \cdot 0,3}{3+0,3} \right) \left(\frac{0,120}{0,180} \right)^2 \right]}} = 1255 \text{ рад/с}$$
$$n = 11984 \text{ об/хв}$$

При цьому максимальна окружна швидкість маховика розраховується за формулою:

$$V = \omega \cdot r_2 = 1255 \cdot 0,180 = 225,9 \text{ м/с}$$

Значення енергоємності маховика визначаємо за потужністю та часом автономної роботи.

Величина потужності маховика знаходиться за формулою:

$$P_{\text{МХВ}} = \frac{E \cdot \eta_{\text{МХВ}}}{t}$$

де E – енергоємність маховика; $\eta_{\text{МХВ}}$ – коефіцієнт корисної дії генератора, приймаємо $\eta_{\text{МХВ}} = 0,9$; t – час автономної дії джерела безперебійного живлення.

Отже, значення енергоємності маховика розраховуємо за формулою:

$$E = \frac{P_{\text{МХВ}} \cdot t}{\eta_{\text{МХВ}}}$$

$$\text{де } P_{\text{МХВ}} = \frac{P}{2} = \frac{800}{2} = 400 \text{ Вт.}$$

$$E_1 = E_2 = \frac{400 \cdot 240}{0,9} \approx 106666,67 \text{ Дж} \approx 106,67 \text{ кДж}$$

						Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Враховуючи те, що енергія відбирається від маховика у діапазоні частот обертання, що складає $0,25 \dots 1 \omega$, то при відбиранні енергії використовується не у повному обсязі, розрахункову енергоємність маховика визначимо із врахуванням коефіцієнта:

$$E_{p1} = E_{p2} = 1,12 * E_1 = 119 \text{ кДж}$$

Знаючи значення енергоємності маховика визначаємо величину моменту інерції.

Формула розрахунку енергоємності маховика:

$$E = \frac{J\omega^2}{2}$$

Отже, величину моменту інерції розраховуємо за формулою:

$$J_1 = J_2 = \frac{2E_{p1}}{\omega^2}$$

$$J_1 = J_2 = \frac{2 \cdot 119000}{1255^2} \approx 0,151 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Отримавши величину моменту інерції визначаємо значення маси маховика.

Величина моменту інерції товстостінного диску розраховується за формулою:

$$J = \frac{m(r_1^2 + r_2^2)}{2}$$

Отже, значення маси маховика розраховуємо за формулою:

$$m_1 = m_2 = \frac{2J_1}{(r_1^2 + r_2^2)}$$

$$m_1 = m_2 = \frac{2 \cdot 0,271}{(0,120^2 + 0,180^2)} = 6,45 \text{ кг}$$

Знаючи масу маховика визначаємо висоту циліндра (форма маховика).

Значення маси маховика розраховується за формулою:

$$m = \frac{\pi(r_2^2 - r_1^2)h\gamma}{g}$$

Отже висоту циліндра розраховуємо за формулою:

$$h_1 = h_2 = \frac{mg}{\pi(r_2^2 - r_1^2)\gamma}$$

						Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$h_1 = h_2 = \frac{6,45 \cdot 9,81}{\pi(0,180^2 - 0,120^2) \cdot 76,7 \cdot 10^3} = 0,015 \text{ м} = 15 \text{ мм}$$

Приймаємо стандартне значення $h = 16 \text{ мм} = 0,016 \text{ м}$ за ГОСТ6636-69 [14].

2.2.3. Розрахунок параметрів спрощеної схеми накопичувача кінетичної енергії

Отримавши значення висоти циліндра, перераховуємо параметри накопичувача кінетичної енергії.

Розраховуємо масу маховика за формулою:

$$m = \frac{\pi(r_2^2 - r_1^2)h\gamma}{g}$$

$$m_1 = m_2 = \frac{\pi(0,180^2 - 0,120^2) \cdot 0,032 \cdot 76,7 \cdot 10^3}{9,81} = 7,07 \text{ кг}$$

Знаючи масу маховика розраховуємо величину моменту інерції за формулою:

$$J = \frac{m(r_1^2 + r_2^2)}{2}$$

$$J_1 = J_2 = \frac{7,27 \cdot (0,120^2 + 0,180^2)}{2} = 0,165 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

Знаючи момент інерції маховика розраховуємо енергоємність маховика за формулою:

$$E = \frac{J\omega^2}{2}$$

$$E_1 = E_2 = \frac{0,165 \cdot 1255^2}{2} = 130333,34 \text{ Дж} \approx 130,34 \text{ кДж}$$

Знаючи енергоємність маховика розраховуємо потужність маховика за формулою:

$$P = \frac{E \cdot \eta_{\text{МХВ}}}{t}$$

$$P_{\text{МХВ1}} = P_{\text{МХВ2}} = \frac{130333,34 \cdot 0,9}{240} = 977,5 \text{ Вт}$$

						Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розраховані параметри накопичувача кінетичної енергії заносимо до таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні параметри спрощеної схеми накопичувача кінетичної енергії

Параметр	Значення	
	Маховик 1	Маховик 2
Внутрішній радіус	$r_{11} = 120 \text{ мм}$	$r_{12} = 120 \text{ мм}$
Зовнішній радіус	$r_{21} = 180 \text{ мм}$	$r_{22} = 180 \text{ мм}$
Висота циліндра маховика	$h_1 = 16 \text{ мм}$	$h_2 = 16 \text{ мм}$
Маса маховика	$m_1 = 7,07 \text{ кг}$	$m_2 = 7,07 \text{ кг}$
Момент інерції маховика	$J_1 = 0,165 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$	$J_2 = 0,165 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
Енергоємність маховика	$E_1 = 130,34 \text{ кДж}$	$E_2 = 130,34 \text{ кДж}$
Потужність маховика	$P_1 = 488,25$	$P_2 = 488,25$

2.3. Розрахунок валу

2.3.1. Вихідні дані

Для забезпечення місця для маховиків та опор, приймаємо розрахункову довжину валу $l = 80 \text{ мм}$.

Розраховуємо сили та моменти, що діють на вал:

Крутний момент від електродвигуна розраховується за формулою [15]:

$$T_{\text{дв}} = 9550 \frac{P}{\omega}$$

$$T_{\text{дв}} = 9550 \frac{977,5 \cdot 10^{-3}}{11984} = 0,778 \text{ Нм}$$

Навантаження від муфт розраховується за формулою [15]:

$$F_{\text{м1}} = F_{\text{м2}} \approx 125\sqrt{T}$$

$$F_{\text{м1}} = F_{\text{м2}} \approx 125\sqrt{0,778} = 110 \text{ Н}$$

При розробленні маховикових накопичувачів енергії використовуються різні схеми розміщення маховиків, зокрема із вертикально або горизонтально розташованою віссю [16]. Враховуючи обрану схему накопичувача із горизонтальною віссю, навантаження від маховиків буде визначатися силою ваги, що діє вертикально перпендикулярно до осі валу (для спрощення розрахунку знехтуємо висотою маховика і приймемо навантаження як точкову силу):

$$F_p = mg$$

$$F_{p1} = 7,07 \cdot 9,81 = 69,36 \text{ Н}$$

$$F_{p2} = 7,07 \cdot 9,81 = 69,36$$

Площина прикладання і напрям сил F_{m1} і F_{m2} обираємо так, щоб навантаження на вал чи реакція в опорі було найбільшим. Отже сили F_{m1} і F_{m2} будуть прикладені у вертикальній площині, сила F_{m1} буде спрямована на вал, а сила F_{m2} буде спрямована від валу.

Навантаженням від ваги муфт та електрогенераторів знехтуємо, так як ці сили не мають значного впливу на вал.

Відстані:

$l = 190 \text{ мм}; a = 59 \text{ мм}; b = 20 \text{ мм}; c = 16 \text{ мм}; d = 20 \text{ мм}; e = 16 \text{ мм}; f = 59 \text{ мм}.$

Матеріал валу – Сталь 40Х [13]:

- термічна обробка покращення
- межа міцності $\sigma_B = 900 \text{ МПа}$
- межа текучості $\sigma_T = 720 \text{ МПа}$

Оскільки у горизонтальній площині відсутні зовнішні сили чи моменти, можемо знехтувати даною площиною.

2.3.2. Визначення ступеня статичної невизначуваності

Наведена система (рис. 2.2) є статично невизначеною, оскільки реакції опор не можна знайти тільки з рівнянь статички.

						Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

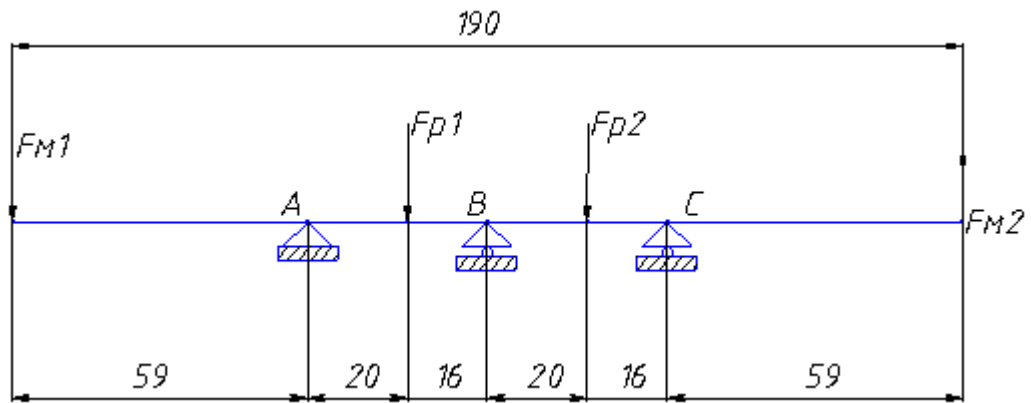


Рис. 2.2 - Конструкція валу

Визначаємо ступінь статичної невизначуваності за формулою [9]:

$$s = 3k - \text{ш}$$

де s – ступінь статичної невизначуваності; k – кількість замкнених контурів за умови повної відсутності шарнірів; ш – кількість шарнірів у перерахунку на одиночні.

Наведена система (рис. 2.1) має один замкнений контур та чотири шарніра.

Отже:

$$s = 3 \cdot 1 - 4 = -1$$

Отже система один раз статично невизначувана.

2.3.3. Заміна статично невизначуваної системи на основну систему

Вирішуємо статично невизначувану систему методом сил за формулою [9]:

$$\delta_{11}X_1 + \Delta_{1P} = 0$$

де Δ_{1P} – переміщення від заданого навантаження; δ_{11} – переміщення в напрямі сили X_1 від одиничної сили $\bar{X}_1 = 1$.

Зайвою опорою обираємо опору В. Прибравши опору В, будуємо еквівалентну систему (рис 2.3), замінивши реакцію опори на силу X .

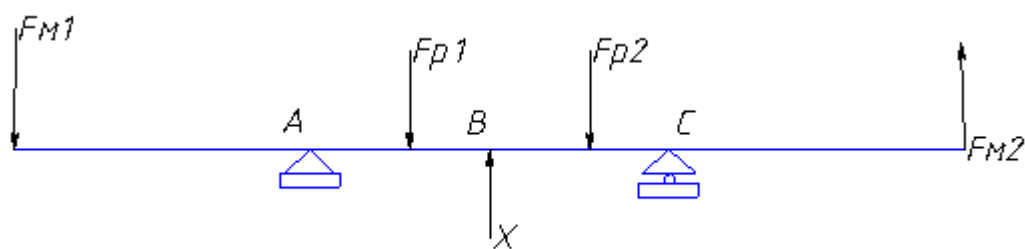


Рис. 2.3 - Еквівалентна система

Прибравши силу X отримуємо основну систему (рис. 2.4).

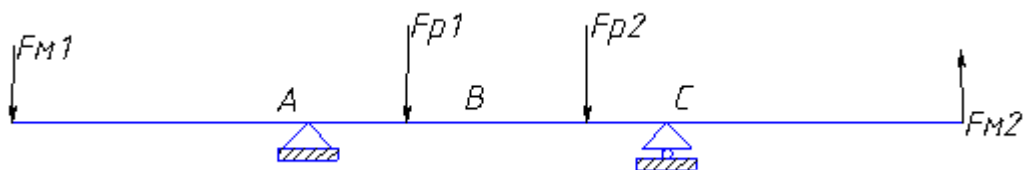


Рис. 2.4 - Основна система

2.3.4. Розрахунок основної системи

Визначаємо реакції опор:

$$\sum M_A = F_{M1} \cdot 0,059 - F_{P1} \cdot 0,020 - F_{P2} \cdot 0,056 + R_C \cdot 0,072 + F_{M2} \cdot 0,131$$

$$R_C = \frac{-F_{M1} \cdot 0,059 + F_{P1} \cdot 0,020 + F_{P2} \cdot 0,056 - F_{M2} \cdot 0,131}{0,072}$$

$$R_C = \frac{-110 \cdot 0,059 + 69,36 \cdot 0,020 + 69,36 \cdot 0,056 - 110 \cdot 0,131}{0,072} = -217 \text{ Н}$$

$$\sum M_C = F_{M1} \cdot 0,131 - R_A \cdot 0,072 + F_{P1} \cdot 0,052 + F_{P2} \cdot 0,016 + F_{M2} \cdot 0,059$$

$$R_A = \frac{F_{M1} \cdot 0,131 + F_{P1} \cdot 0,052 + F_{P2} \cdot 0,016 + F_{M2} \cdot 0,059}{0,072}$$

$$R_A = \frac{110 \cdot 0,131 + 69,36 \cdot 0,052 + 69,36 \cdot 0,016 + 110 \cdot 0,059}{0,072} = 355,8 \text{ Н}$$

Оскільки значення реакції опори R_C – від'ємне, змінюємо напрямок прикладання опори на протилежний.

Перевірка:

$$-F_{M1} + R_A - F_{P1} - F_{P2} + R_C + F_{M2} = -110 + 355,8 - 69,36 - 69,36 - 217 + 110 = 0$$

Будуємо епюри згинальних моментів (рис. 2.5):

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

$$\text{I: } M_I = -F_{M1} \cdot 0,059 = -110 \cdot 0,059 = -6,49 \text{ Нм}$$

$$\text{II: } M_{II} = -F_{M1} \cdot 0,079 + R_A \cdot 0,020 = -110 \cdot 0,079 + 355,8 \cdot 0,020 = -1,574 \text{ Нм}$$

$$\text{III: } M_{III} = -F_{M1} \cdot 0,095 + R_A \cdot 0,036 - F_{P1} \cdot 0,016 = -110 \cdot 0,095 + 355,8 \cdot 0,036 - 69,36 \cdot 0,016 = 1,25 \text{ Нм}$$

$$\text{IV: } M_{IV} = F_{M1} \cdot 0,095 - R_C \cdot 0,036 - F_{P2} \cdot 0,020 = 110 \cdot 0,095 - 217 \cdot 0,036 - 69,36 \cdot 0,020 = 1,25 \text{ Нм}$$

$$\text{V: } M_V = F_{M1} \cdot 0,075 - R_C \cdot 0,016 = 110 \cdot 0,075 - 217 \cdot 0,016 = 4,78 \text{ Нм}$$

$$\text{VI: } M_{VI} = F_{M2} \cdot 0,059 = 110 \cdot 0,059 = 6,49 \text{ Нм}$$

Будуємо епюри крутних моментів (рис. 2.5):

$$\text{I: } T_I = T_{дв} = 0,778 \text{ Нм}$$

$$\text{II: } T_{II} = T_{дв} = 0,778 \text{ Нм}$$

$$\text{III: } T_{III} = T_{дв} = 0,778 \text{ Нм}$$

$$\text{IV: } T_{IV} = T_{дв} = 0,778 \text{ Нм}$$

$$\text{V: } T_V = T_{дв} = 0,778 \text{ Нм}$$

$$\text{VI: } T_{VI} = T_{дв} = 0,778 \text{ Нм}$$

						Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

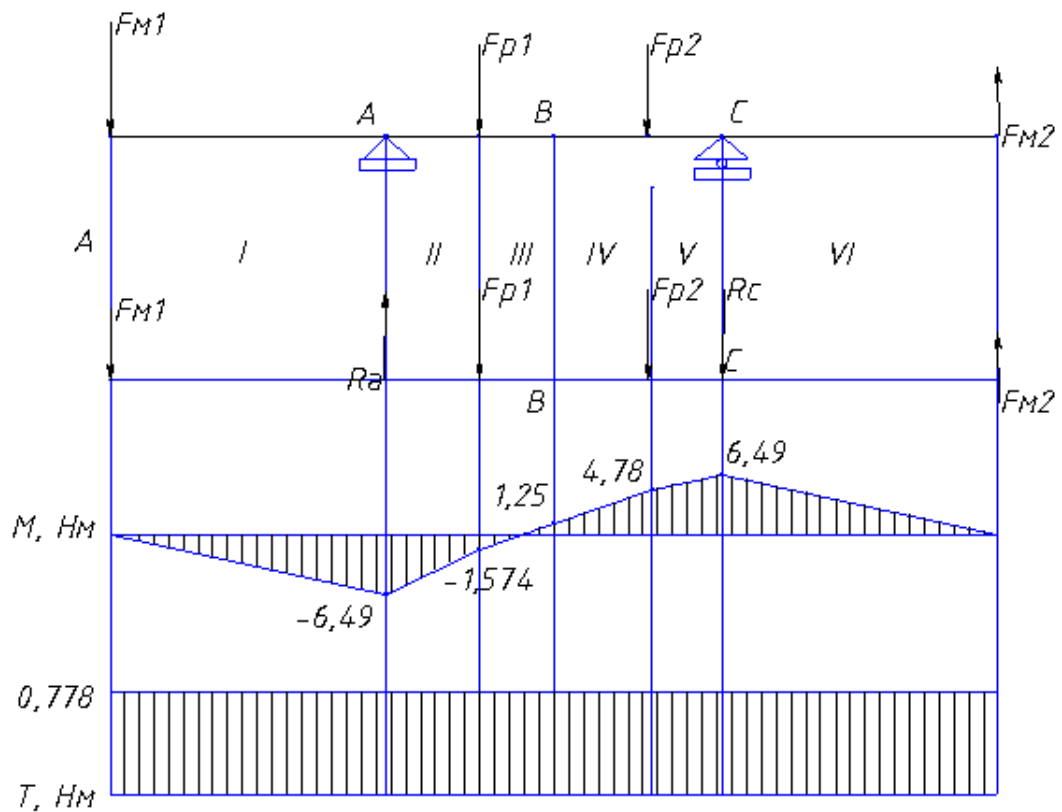


Рис. 2.5 - Епюри згинальних та крутних моментів основної схеми

2.3.5. Визначення переміщень у точці В

Переміщення Δ_{1P} у точці В знайдемо за формулою Верещагіна [9]:

$$\Delta_{1P} = \sum_{i=1}^n \frac{\omega_i \cdot y_i}{E_i J_i}$$

де ω_i – площа і-тої епюри; y_i – ордината одиничної епюри, що знаходиться під центром тяжіння і-тої епюри; $E_i J_i$ – жорсткість і-тої балки при згині.

Будуємо одиничну систему, де діє тільки сила $\bar{X}_1 = 1$ в напрямі сили X_1 :

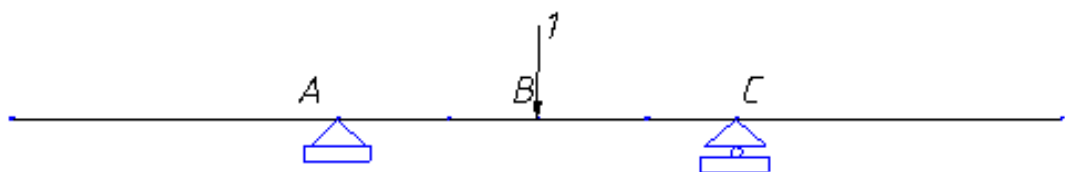


Рис. 2.6 - Одинична система

Визначаємо реакції опор:

$$\sum M_A = -1 \cdot 0,036 + R_C \cdot 0,072$$

$$R_C = \frac{1 \cdot 0,036}{0,072}$$

$$R_C = \frac{0,036}{0,072} = 0,5 \text{ м}$$

$$\sum M_C = 1 \cdot 0,036 - R_A \cdot 0,072$$

$$R_A = \frac{-1 \cdot 0,036}{0,072}$$

$$R_A = -\frac{0,036}{0,072} = -0,5 \text{ м}$$

Змінюємо напрямок R_A на протилежний і беремо значення 0,5 м.

Будуємо епюри (рис. 2.7):

$$\text{I: } M_I = 0$$

$$\text{II: } M_{II} = -R_A \cdot 0,020 = -0,5 \cdot 0,020 = -0,010 \text{ м}$$

$$\text{III: } M_{III} = -R_A \cdot 0,036 = -0,5 \cdot 0,036 = -0,018 \text{ м}$$

$$\text{IV: } M_{IV} = R_C \cdot 0,036 = 0,5 \cdot 0,036 = 0,018 \text{ м}$$

$$\text{V: } M_V = R_C \cdot 0,016 = 0,5 \cdot 0,016 = 0,008 \text{ м}$$

$$\text{VI: } M_{VI} = 0$$

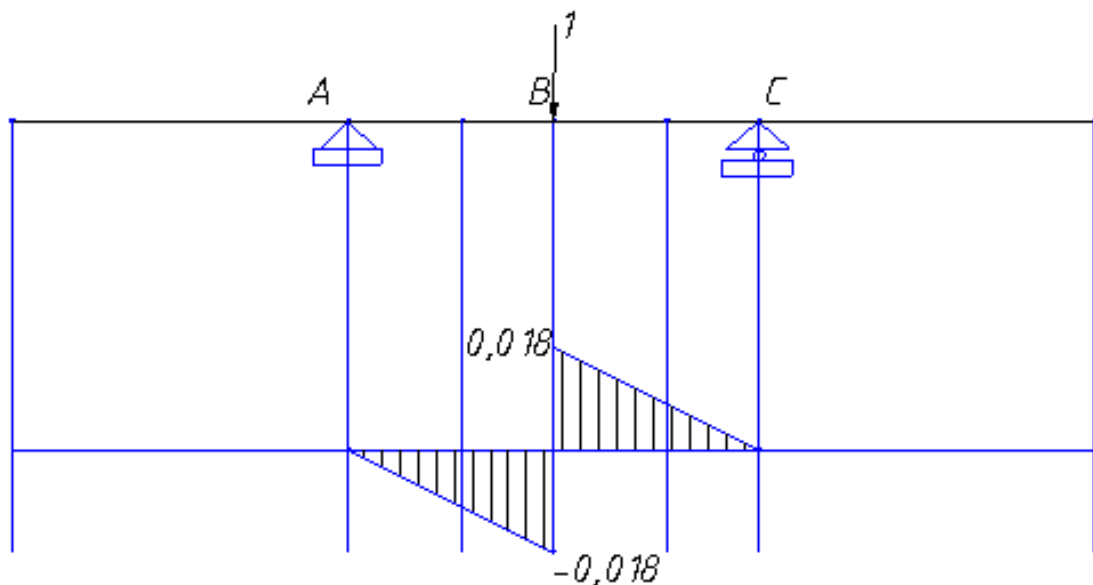


Рис. 2.7 - Епюри згинальних моментів одиничної системи

Будуємо окремі епюри сил і реакцій опор (рис. 2.8):

$$F_{M1}: M_{F_{M1}} = -F_{M1} \cdot 0,086 = -110 \cdot 0,086 = -9,46 \text{ Нм}$$

$$R_A: M_{R_A} = R_A \cdot 0,036 = 355,8 \cdot 0,036 = 12,8 \text{ Нм}$$

$$F_{P1}: M_{F_{P1}} = -F_{P1} \cdot 0,016 = -69,36 \cdot 0,016 = -1,11 \text{ Нм}$$

$$F_{P2}: M_{F_{P2}} = -F_{P2} \cdot 0,020 = -69,36 \cdot 0,020 = -1,39 \text{ Нм}$$

$$R_C: M_{R_C} = -R_C \cdot 0,036 = -217 \cdot 0,036 = -7,81 \text{ Нм}$$

$$F_{M2}: M_{F_{M2}} = F_{M2} \cdot 0,086 = 110 \cdot 0,086 = 9,46 \text{ Нм}$$

Визначаємо площі епюр та відповідні ординати одиничної епюри (рис. 2.8):

$$F_{M1}: \omega_1 = \frac{1}{2} \cdot M_{F_{M1}} \cdot l = \frac{1}{2} \cdot (-9,46) \cdot 0,086 = -0,407 \text{ Нм}^2$$

$$y_1 = 0$$

$$R_A: \omega_2 = \frac{1}{2} \cdot M_{R_A} \cdot l = \frac{1}{2} \cdot 12,8 \cdot 0,036 = 0,23 \text{ Нм}^2$$

$$y_2 = -0,018 \frac{0,036 \cdot \frac{2}{3}}{0,036} = -0,012 \text{ м}$$

$$F_{P1}: \omega_3 = \frac{1}{2} \cdot M_{F_{P1}} \cdot l = \frac{1}{2} \cdot (-1,11) \cdot 0,016 = -0,009 \text{ Нм}^2$$

$$y_3 = -0,018 \frac{0,020 + 0,016 \cdot \frac{2}{3}}{0,036} = -0,015 \text{ м}$$

$$F_{P2}: \omega_4 = \frac{1}{2} \cdot M_{F_{P2}} \cdot l = \frac{1}{2} \cdot (-1,39) \cdot 0,020 = -0,014 \text{ Нм}^2$$

$$y_4 = 0,018 \frac{0,016 + 0,020 \cdot \frac{2}{3}}{0,036} = 0,015 \text{ м}$$

$$R_C: \omega_5 = \frac{1}{2} \cdot M_{R_C} \cdot l = \frac{1}{2} \cdot (-7,81) \cdot 0,036 = -0,141 \text{ Нм}^2$$

$$y_5 = 0,018 \frac{0,036 \cdot \frac{2}{3}}{0,036} = 0,012 \text{ м}$$

$$F_{M2}: \omega_6 = \frac{1}{2} \cdot M_{F_{M2}} \cdot l = \frac{1}{2} \cdot 9,46 \cdot 0,086 = 0,407 \text{ Нм}^2$$

$$y_6 = 0$$

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

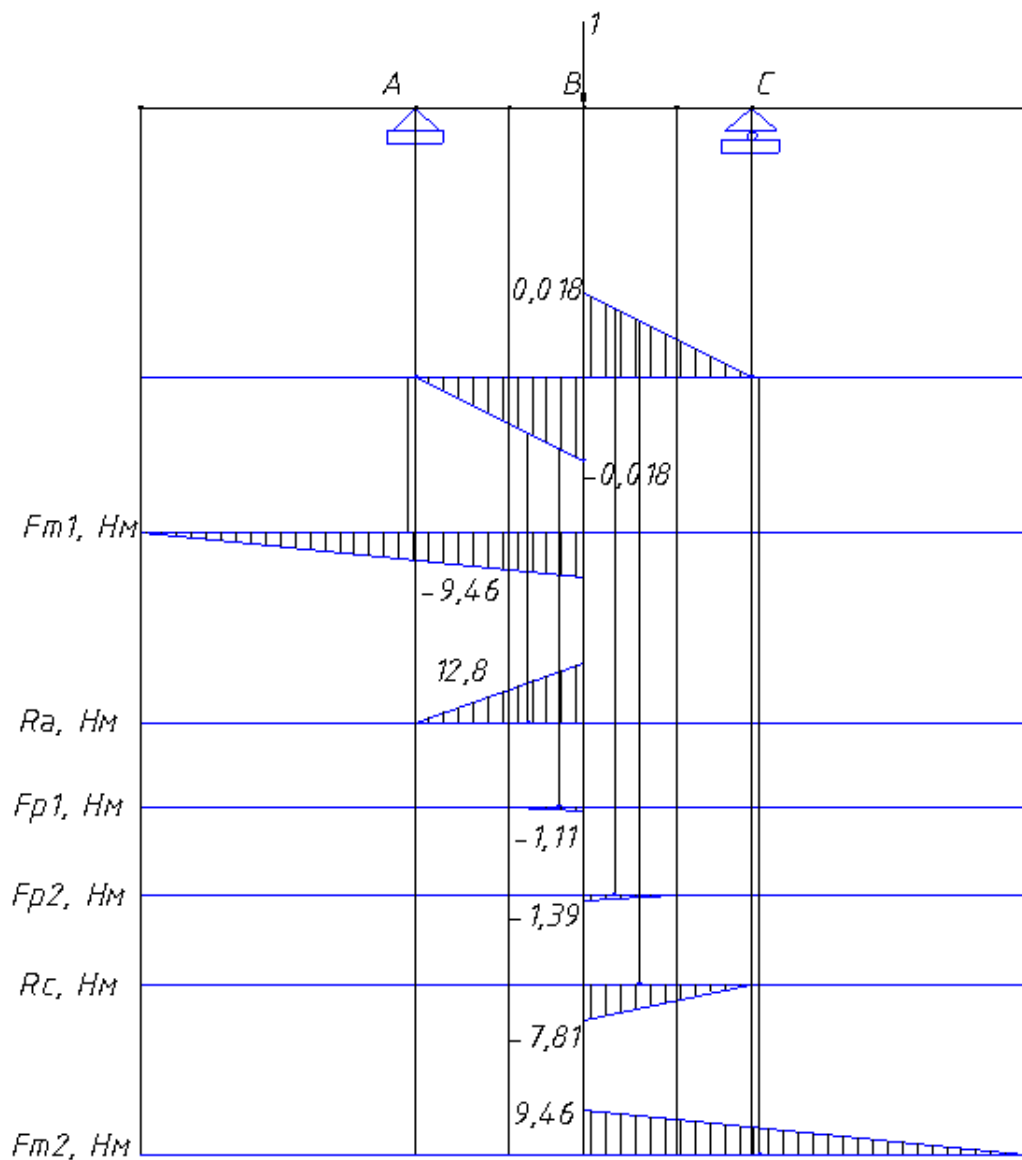


Рис. 2.8 - Епюри сил і реакцій опор

Визначаємо переміщення в точці В з формули Верещагіна [9]:

$$\Delta_{1P} = \sum_{i=1}^n \frac{\omega_i \cdot y_i}{E_i J_i}$$

$$\Delta_{1P} = \frac{1}{EJ} (\omega_1 \cdot y_1 + \omega_2 \cdot y_2 + \omega_3 \cdot y_3 + \omega_4 \cdot y_4 + \omega_5 \cdot y_5 + \omega_6 \cdot y_6)$$

$$= \frac{1}{EJ} (-0,407 \cdot 0 + 0,23 \cdot (-0,012) + (-0,009) \cdot (-0,015)$$

$$+ (-0,014) \cdot 0,015 + (-0,141) \cdot 0,012 + 0,407 \cdot 0) = - \frac{0,004527}{EJ}$$

Обчислюємо переміщення δ_{11} :

$$\delta_{11} = \frac{\omega_{\delta_{11}} \cdot y_{\delta_{11}}}{EJ} = \frac{0,018}{EJ} \cdot \frac{2}{3} 0,036 = \frac{0,000432}{EJ}$$

2.3.6. Визначення значення сили X_1

Рівняння переміщень методу сил:

$$\delta_{11} X_1 + \Delta_{1P} = 0$$

З рівняння отримуємо формулу (8):

$$X_1 = -\frac{\Delta_{1P}}{\delta_{11}}$$

Отже:

$$X_1 = \frac{0,001854 \cdot EJ}{0,000432 \cdot EJ} = \frac{0,004527}{0,000432} = 10,78 \text{ Н}$$

2.3.7. Розрахунок еквівалентної системи

Знаючи величину сили X_1 можемо розрахувати еквівалентну систему.

Визначаємо реакції опор:

$$\sum M_A = F_{M1} \cdot 0,059 - F_{P1} \cdot 0,020 + X_1 \cdot 0,036 - F_{P2} \cdot 0,056 + R_C \cdot 0,072 + F_{M2} \cdot 0,131$$

$$R_C = \frac{-F_{M1} \cdot 0,059 + F_{P1} \cdot 0,020 - X_1 \cdot 0,036 + F_{P2} \cdot 0,056 - F_{M2} \cdot 0,131}{0,072}$$

$$R_C = \frac{-110 \cdot 0,059 + 69,36 \cdot 0,020 - 10,78 \cdot 0,036 + 69,36 \cdot 0,056 - 110 \cdot 0,131}{0,072} = -222,45 \text{ Н}$$

$$\sum M_C = F_{M1} \cdot 0,131 - R_A \cdot 0,072 + F_{P1} \cdot 0,052 - X_1 \cdot 0,036 + F_{P2} \cdot 0,016 + F_{M2} \cdot 0,059$$

$$R_A = \frac{F_{M1} \cdot 0,131 + F_{P1} \cdot 0,052 - X_1 \cdot 0,036 + F_{P2} \cdot 0,016 + F_{M2} \cdot 0,059}{0,072}$$

$$R_A = \frac{110 \cdot 0,131 + 69,36 \cdot 0,052 - 10,78 \cdot 0,036 + 69,36 \cdot 0,016 + 110 \cdot 0,059}{0,072} = 350,39 \text{ Н}$$

Оскільки значення реакції опори R_C – від'ємне, змінюємо напрямок прикладання опори на протилежний.

Перевірка:

$$-F_{M1} + R_A - F_{P1} + X_1 - F_{P2} + R_C + F_{M2} \\ = -110 + 350,39 - 69,36 + 10,78 - 69,36 - 222,45 + 110 = 0$$

Будуємо епюри згинальних моментів (рис. 2.9):

$$\text{I: } M_I = -F_{M1} \cdot 0,059 = -110 \cdot 0,059 = -6,49 \text{ Нм}$$

$$\text{II: } M_{II} = -F_{M1} \cdot 0,079 + R_A \cdot 0,020 = -110 \cdot 0,079 + 350,39 \cdot 0,020 = \\ -1,68 \text{ Нм}$$

$$\text{III: } M_{III} = -F_{M1} \cdot 0,095 + R_A \cdot 0,036 - F_{P1} \cdot 0,016 = -110 \cdot 0,095 + \\ 350,39 \cdot 0,036 - 69,36 \cdot 0,016 = 1,05 \text{ Нм}$$

$$\text{IV: } M_{IV} = F_{M1} \cdot 0,095 - R_C \cdot 0,036 - F_{P2} \cdot 0,020 = 110 \cdot 0,095 - 222,45 \cdot \\ 0,036 - 69,36 \cdot 0,020 = 1,05 \text{ Нм}$$

$$\text{V: } M_V = F_{M1} \cdot 0,075 - R_C \cdot 0,016 = 110 \cdot 0,075 - 222,45 \cdot 0,016 = 4,69 \text{ Нм}$$

$$\text{VI: } M_{VI} = F_{M2} \cdot 0,059 = 78 \cdot 0,059 = 6,49 \text{ Нм}$$

Будуємо епюри крутних моментів (рис. 2.9):

$$\text{I: } T_I = T_{дв} = 0,778 \text{ Нм}$$

$$\text{II: } T_I = T_{дв} = 0,778 \text{ Нм}$$

$$\text{III: } T_I = T_{дв} = 0,778 \text{ Нм}$$

$$\text{IV: } T_{IV} = T_{дв} = 0,778 \text{ Нм}$$

$$\text{V: } T_V = T_{дв} = 0,778 \text{ Нм}$$

$$\text{VI: } T_{VI} = T_{дв} = 0,778 \text{ Нм}$$

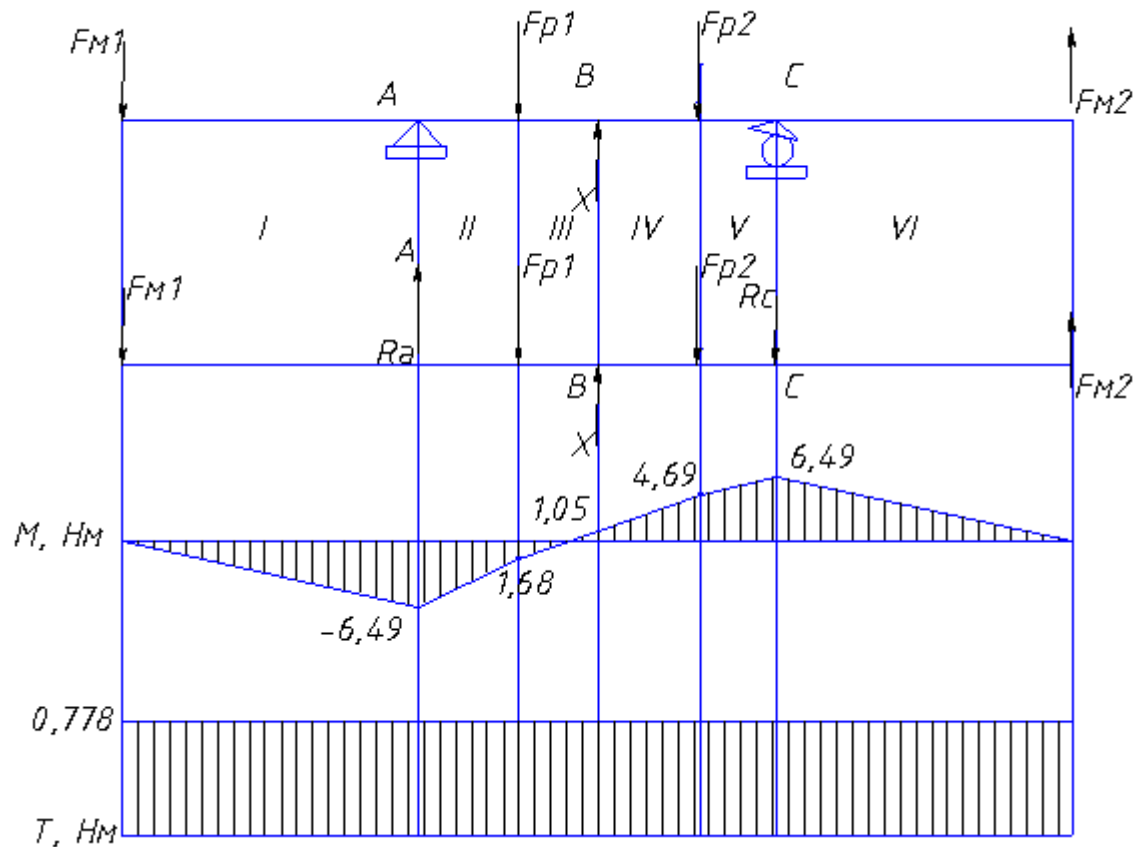


Рис. 2.9 - Епюри згинальних та крутних моментів еквівалентної схеми

2.3.8. Визначаємо діаметри валу

Визначаємо еквівалентні згинальні моменти за формулою [13]:

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{M^2 + (\alpha T)^2}$$

де M – згинальний момент;

T – крутний момент;

α – коефіцієнт, $\alpha \approx \frac{\sqrt{3}}{4}$.

Отже:

$$M_{\text{еквI}} = \sqrt{M_I^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{4} T_I\right)^2} = \sqrt{(-6,49)^2 + \frac{3}{2} (0,778)^2} = 6,68 \text{ Нм}$$

$$M_{\text{еквII}} = \sqrt{M_{II}^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{4} T_{II}\right)^2} = \sqrt{(-1,68)^2 + \frac{3}{2} (0,778)^2} = 2,3 \text{ Нм}$$

$$M_{\text{еквIII}} = \sqrt{M_{III}^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{4} T_{III}\right)^2} = \sqrt{1,05^2 + \frac{3}{2}(0,778)^2} = 1,89 \text{ Нм}$$

$$M_{\text{еквIV}} = \sqrt{M_{IV}^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{4} T_{IV}\right)^2} = \sqrt{1,05^2 + \frac{3}{2}(0,778)^2} = 1,89 \text{ Нм}$$

$$M_{\text{еквV}} = \sqrt{M_V^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{4} T_V\right)^2} = \sqrt{4,69^2 + \frac{3}{2}(0,778)^2} = 4,49 \text{ Нм}$$

$$M_{\text{еквVI}} = \sqrt{M_{VI}^2 + \left(\frac{\sqrt{3}}{4} T_{VI}\right)^2} = \sqrt{6,49^2 + \frac{3}{2}(0,778)^2} = 6,68 \text{ Нм}$$

Визначаємо розрахункові діаметри валу за формулою [13]:

$$d_{\text{роз}} = \sqrt[3]{\frac{10^3 \cdot M_{\text{екв}}}{0,1[\sigma_u]}}$$

де $[\sigma_u]$ – допустиме напруження на згин,

$$[\sigma_u] = \frac{\sigma_T}{s_{\text{зап}}} \quad (s_{\text{зап}} = 3 \dots 4) \quad [17],$$

$$[\sigma_u] = \frac{720}{3} = 240 \text{ МПа.}$$

Отже:

$$d_{\text{розI}} = \sqrt[3]{\frac{10^3 \cdot M_{\text{еквI}}}{0,1 \cdot 240}} = \sqrt[3]{\frac{10^3 \cdot 6,68}{0,1 \cdot 240}} = 6,53 \text{ мм}$$

$$d_{\text{розII}} = \sqrt[3]{\frac{10^3 \cdot M_{\text{еквII}}}{0,1 \cdot 240}} = \sqrt[3]{\frac{10^3 \cdot 2,3}{0,1 \cdot 240}} = 4,58 \text{ мм}$$

$$d_{\text{розIII}} = \sqrt[3]{\frac{10^3 \cdot M_{\text{еквIII}}}{0,1 \cdot 240}} = \sqrt[3]{\frac{10^3 \cdot 1,89}{0,1 \cdot 240}} = 4,29 \text{ мм}$$

$$d_{\text{розIV}} = \sqrt[3]{\frac{10^3 \cdot M_{\text{еквIV}}}{0,1 \cdot 240}} = \sqrt[3]{\frac{10^3 \cdot 1,89}{0,1 \cdot 240}} = 4,29 \text{ мм}$$

$$d_{\text{розV}} = \sqrt[3]{\frac{10^3 \cdot M_{\text{еквV}}}{0,1 \cdot 240}} = \sqrt[3]{\frac{10^3 \cdot 4,49}{0,1 \cdot 240}} = 5,72 \text{ мм}$$

						Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$d_{\text{роз}VI} = \sqrt[3]{\frac{10^3 \cdot M_{\text{екв}VI}}{0,1 \cdot 240}} = \sqrt[3]{\frac{10^3 \cdot 6,68}{0,1 \cdot 240}} = 6,53 \text{ мм}$$

Приймаємо стандартні значення за ГОСТ6636-69 [14]:

$$\begin{array}{lll} d_I = 8,0 \text{ мм} & d_{III} = 5,0 \text{ мм} & d_V = 6,3 \text{ мм} \\ d_{II} = 5,0 \text{ мм} & d_{IV} = 5,0 \text{ мм} & d_{VI} = 8,0 \text{ мм} \end{array}$$

З конструктивних міркувань приймаємо наступні значення за ГОСТ6636-69 [14]:

$$\begin{array}{lll} d_I = 10 \text{ мм} & d_{III} = 22 \text{ мм} & d_V = 28 \text{ мм} \\ d_{II} = 12 \text{ мм} & d_{IV} = 28 \text{ мм} & d_{VI} = 10 \text{ мм} \end{array}$$

2.3.9. Перевірка на статичну міцність

Визначаємо нормальну напругу від згину за формулою:

$$\sigma_u = \frac{M}{W_u}$$

де W_u – момент опору згину, для круглого перерізу $W_u \approx 0,1 \cdot d^3$

Отже:

$$\sigma_{uI} = \frac{M_I}{0,1 \cdot d_I^3} = \frac{-6,68}{0,1 \cdot 0,010^3} = -66,8 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{uII} = \frac{M_{II}}{0,1 \cdot d_{II}^3} = \frac{2,3}{0,1 \cdot 0,012^3} = 13,31 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{uIII} = \frac{M_{III}}{0,1 \cdot d_{III}^3} = \frac{1,89}{0,1 \cdot 0,022^3} = 1,77 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{uIV} = \frac{M_{IV}}{0,1 \cdot d_{IV}^3} = \frac{1,89}{0,1 \cdot 0,028^3} = 0,86 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{uV} = \frac{M_V}{0,1 \cdot d_V^3} = \frac{4,49}{0,1 \cdot 0,028^3} = 2,04 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{uVI} = \frac{M_{VI}}{0,1 \cdot d_{VI}^3} = \frac{6,68}{0,1 \cdot 0,010^3} = 66,8 \text{ МПа}$$

Визначаємо дотичні напруження за формулою:

$$\tau = \frac{T}{W_\rho}$$

де W_ρ – момент опору крученню, для круглого перерізу $W_\rho \approx 0,2 \cdot d^3$

						Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже:

$$\tau_I = \frac{T_I}{0,2 \cdot d_I^3} = \frac{0,778}{0,2 \cdot 0,010^3} = 3,89 \text{ МПа}$$

$$\tau_{II} = \frac{T_{II}}{0,2 \cdot d_{II}^3} = \frac{0,778}{0,2 \cdot 0,012^3} = 2,25 \text{ МПа}$$

$$\tau_{III} = \frac{T_{III}}{0,2 \cdot d_{III}^3} = \frac{0,778}{0,2 \cdot 0,022^3} = 0,36 \text{ МПа}$$

$$\tau_{IV} = \frac{T_{IV}}{0,2 \cdot d_{IV}^3} = \frac{0,778}{0,2 \cdot 0,028^3} = 0,18 \text{ МПа}$$

$$\tau_V = \frac{T_V}{0,2 \cdot d_V^3} = \frac{0,778}{0,2 \cdot 0,028^3} = 0,18 \text{ МПа}$$

$$\tau_{VI} = \frac{T_{VI}}{0,2 \cdot d_{VI}^3} = \frac{0,778}{0,2 \cdot 0,010^3} = 3,89 \text{ МПа}$$

Умова статичної міцності [15]:

$$\sigma_{\text{екв}} = \sqrt{(\sigma_{\text{max}})^2 + 3(\tau_{\text{max}})^2} \leq [\sigma]$$

де $\sigma_{\text{екв}}$ – еквівалентні напруження;

σ_{max} – максимальні напруження згину;

τ_{max} – максимальні дотичні напруження;

$[\sigma]$ – допустимі напруження, $[\sigma] = \frac{\sigma_T}{[S_T]}$ ($[S_T] = 1,2 \dots 1,8$) –

коефіцієнт запасу по границі плинності, $[\sigma] = \frac{720}{1,8} = 400 \text{ МПа}$

Отже:

$$\sigma_{\text{еквI}} = \sqrt{(-66,8)^2 + 3(3,89)^2} = 46,1 \text{ МПа} \leq [\sigma]$$

$$\sigma_{\text{еквII}} = \sqrt{(13,31)^2 + 3(2,25)^2} = 26,89 \text{ МПа} \leq [\sigma]$$

$$\sigma_{\text{еквIII}} = \sqrt{(1,77)^2 + 3(0,36)^2} = 15,52 \text{ МПа} \leq [\sigma]$$

$$\sigma_{\text{еквIV}} = \sqrt{(0,86)^2 + 3(0,18)^2} = 7,94 \text{ МПа} \leq [\sigma]$$

$$\sigma_{\text{еквV}} = \sqrt{(2,04)^2 + 3(0,18)^2} = 34,77 \text{ МПа} \leq [\sigma]$$

$$\sigma_{\text{еквVI}} = \sqrt{(66,8)^2 + 3(3,89)^2} = 46,1 \text{ МПа} \leq [\sigma]$$

Отже статична міцність валу достатня.

						Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.3.10. Розрахунок на опір втоми

Аналізуючи перерізи валу, де напруження найбільші, а також прийняті розміри валу, можна зробити висновок, що потенційно слабкі перерізи I і VI.

Параметри обраних перерізів:

I: $d_I = 10$ мм, $M_I = 6,68$ Нм, $T_I = 0,778$ Нм

VI: $d_{VI} = 10$ мм, $M_{VI} = 6,68$ Нм, $T_{VI} = 0,778$ Нм

Оскільки обрані перерізи мають однакові параметри, виконаєм розрахунок лише для перерізу I.

Запас міцності S розраховується за формулою [15; 16]:

$$S = \frac{S_\sigma S_\tau}{\sqrt{S_\sigma^2 + S_\tau^2}} \geq [S]$$

де S_σ – запас міцності по нормальних напруженнях; S_τ – запас міцності по дотичних напруженнях; $[S]$ – допустимий запас міцності, $[S] = 1,7 \dots 2,5$, приймаємо $[S] = 2$

Запас міцності по нормальних напруженнях розраховується за формулою [15; 16]:

$$S_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{K_{\sigma D} \sigma_a}$$

Запас міцності по дотичних напруженнях розраховується за формулою [15; 16]:

$$S_\tau = \frac{\tau_{-1}}{K_{\tau D} \tau_a + \psi_\tau \tau_T}$$

де σ_a, τ_a – змінні складових циклів напружень;

τ_T – стала складова циклів;

σ_{-1}, τ_{-1} – границі витривалості, для сталі 40X $\sigma_{-1} = 320$ МПа, $\tau_{-1} = 200$ МПа;

$K_{\sigma D}, K_{\tau D}$ – сумарні коефіцієнти зниження межі витривалості;

ψ_τ – коефіцієнт, що характеризує чутливість матеріалу до асиметрії циклу напружень, для сталі 40X $\psi_\tau = 0,15$

$$\sigma_a = \sigma_u = 66,8 \text{ МПа}; \tau_a = \tau_T = \frac{\tau}{2} = \frac{3,89}{2} = 1,945 \text{ МПа}$$

Сумарні коефіцієнти зниження межі витривалості розраховуються за формулою [15; 16]:

						Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$K_{\sigma D} = \left(\frac{K_{\sigma}}{K_{d\sigma}} + K_F - 1 \right) / K_V$$

$$K_{\tau D} = \left(\frac{K_{\tau}}{K_{d\tau}} + K_F - 1 \right) / K_V$$

де K_{σ}, K_{τ} – ефективні коефіцієнти концентрації, для обраного перерізу $K_{\sigma} = 1, K_{\tau} = 1$;

$K_{d\sigma}, K_{d\tau}$ – коефіцієнти впливу абсолютних розмірів поперечного перерізу, $K_{d\sigma} = K_{d\tau} = 0,87$ [20];

K_F – коефіцієнт впливу шорсткості поверхні, $K_F = 1,1$ [20];

K_V – коефіцієнт впливу зміцнення, що вводиться для валів із поверхневим зміцненням, $K_V = 1$.

Отже:

$$K_{\sigma D} = \left(\frac{1}{0,87} + 1,1 - 1 \right) / 1 = 1,25$$

$$K_{\tau D} = \left(\frac{1}{0,87} + 1,1 - 1 \right) / 1 = 1,25$$

Розраховуємо запаси міцності по напруженнях:

$$S_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{K_{\sigma D} \sigma_a} = \frac{320}{1,25 \cdot 66,8} = 3,83$$

$$S_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{K_{\tau D} \tau_a + \psi_{\tau} \tau_T} = \frac{200}{1,25 \cdot 1,945 + 0,15 \cdot 1,945} = 73,45$$

Розраховуємо запас міцності:

$$S = \frac{S_{\sigma} S_{\tau}}{\sqrt{S_{\sigma}^2 + S_{\tau}^2}} = \frac{3,83 \cdot 73,45}{\sqrt{3,83^2 + 73,45^2}} = 3,83 \geq 2$$

Отже втомна міцність валу достатня.

2.4. Розрахунок підшипників

2.4.1. Вибір підшипників кочення

Вихідні параметри:

- Орієнтовний діаметр валу під підшипники: $d_1 = 12$ мм; $d_2 = 20$ мм; $d_3 = 12$ мм;

						Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Реакції в опорах: $F_{rA} = 350,39 \text{ Н}$; $F_{rB} = 10,78 \text{ Н}$; $F_{rC} = 222,45$;
- Швидкість обертання валу $\omega = 1255 \text{ рад/с}$;
- Режим роботи – важкий В;
- Короткочасні перевантаження – до 125%;
- Робоча температура підшипників – до 60°C ;
- Термін роботи системи $h = 17520 \text{ год}$

Оскільки діаметр валу підшипники 1 та 3 однакові, виконуємо розрахунки для опори А як більш навантаженої та опори В.

Зважаючи на відсутність осьових сил, орієнтовно призначаємо радіальний однорядний кульковий підшипник середньої серії 301 для опори А і С та радіальний однорядний кульковий підшипник надлегкої серії 1000904 для опори Б [18].

Призначені підшипники мають такі базові вантажності [18]:

- Радіальний однорядний кульковий підшипник середньої серії 301 – базова статична вантажність $C_0 = 4650 \text{ Н}$; базова динамічна вантажність $C = 9750 \text{ Н}$
- Радіальний однорядний кульковий підшипник надлегкої серії 1000904 – базова статична вантажність $C_0 = 3040 \text{ Н}$; базова динамічна вантажність $C = 6550 \text{ Н}$.

2.4.2. Перевірочний розрахунок підшипників кочення

Визначаємо розрахункове еквівалентне навантаження за формулою [19]:

$$R = XVF K_\delta K_T$$

де X – коефіцієнт радіальних навантажень, $X = 1$ для радіального кулькового підшипника у випадку відсутності осьового навантаження;

V – коефіцієнт кільця, $V = 1$ (обертається внутрішнє кільце);

K_δ – коефіцієнт безпеки, $K_\delta = 1,2$ [21];

K_T – температурний коефіцієнт, $K_T = 1$.

Отже:

$$R_A = XVF_{rA} K_\delta K_T = 1 \cdot 1 \cdot 350,39 \cdot 1,2 \cdot 1 = 420,5 \text{ Н}$$

$$R_B = XVF_{rB} K_\delta K_T = 1 \cdot 1 \cdot 10,78 \cdot 1,2 \cdot 1 = 12,9 \text{ Н}$$

З врахуванням режиму навантаження протягом терміну служби:

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

$$R_{EA} = 0,8 \cdot R_A = 0,8 \cdot 420,5 = 336,4 \text{ Н}$$

$$R_{EB} = 0,8 \cdot R_B = 0,8 \cdot 12,9 = 10,3 \text{ Н}$$

Визначаємо розрахункову довговічність в млн. об. за формулою [19]:

$$L = a_1 a_2 \left(\frac{C}{R_E} \right)^P$$

де $a_1 = 1$ – для 90%-ї надійності підшипників;

$a_2 = 0,7$ – для кулькових підшипників;

$P = 3$ – для кулькових підшипників.

Отже:

$$L_A = a_1 a_2 \left(\frac{C}{R_{EA}} \right)^P = 1 \cdot 0,7 \left(\frac{9750}{336,4} \right)^3 = 17043 \text{ млн. об.}$$

$$L_B = a_1 a_2 \left(\frac{C}{R_{EB}} \right)^P = 1 \cdot 0,7 \left(\frac{6550}{10,3} \right)^3 = 1,8 \cdot 10^8 \text{ млн. об.}$$

Визначаємо розрахункову довговічність в годинах за формулою [19]:

$$L_h = 1745 \frac{L}{\omega} \geq h$$

Отже:

$$L_{hA} = 1745 \frac{L_A}{\omega} = 1745 \frac{17043}{1255} = 23697 \text{ год} \geq 17520 \text{ год}$$

$$L_{hB} = 1745 \frac{L_B}{\omega} = 1745 \frac{1,8 \cdot 10^8}{1255} = 2,5 \cdot 10^8 \text{ год} \geq 17520 \text{ год}$$

Отже довговічність підшипників задовольняє вимоги щодо довговічності системи.

2.5. Підбір комплектуючих

На основі проведених розрахунків підберемо обладнання, що необхідне для функціонування джерела безперебійного живлення.

Розрахованим параметрам відповідає Мотор QSD165D-50 (рис 2.10; 2.11) [20]. Вибраний мотор має змогу досягати потрібної для накопичувача кінетичної енергії швидкості обертання. Електрична машина містить постійні магніти, що дозволяє використовувати її у якості генератора. В конструкції цього мотора

						Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

присутній датчик швидкості обертання (датчики Холла), що необхідно для розгону високоінерційних мас та контролю частоти обертання.

 QS MOTOR



Рис. 2.10 - мотор QSD165D-50 [20]

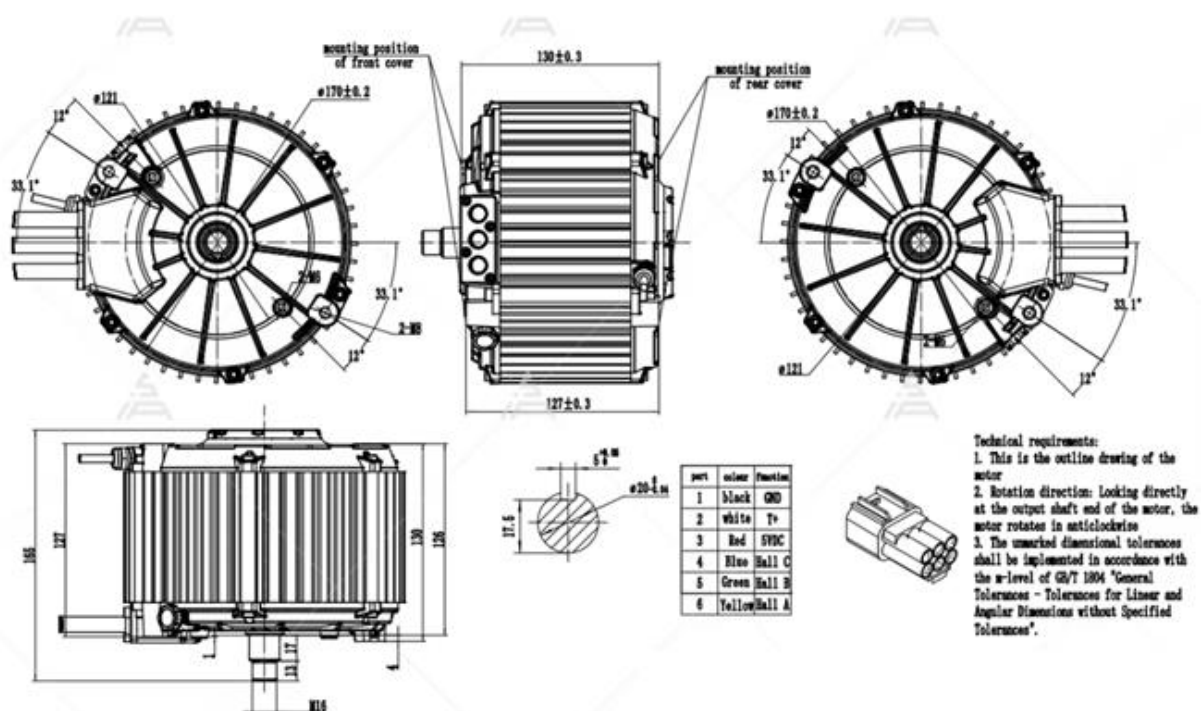


Рис. 2.11 – Ескізне креслення мотора QSD165D-50 [20]

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

Паспортні дані мотора QSD165D-50 наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Паспортні данн мотора QSD165D-50 [20]

Параметр	Значення
Максимальна потужність	до 10000Вт
Напруга живлення	72 В
Максимальний крутний момент	73 Нм
Рекомендована максимальна швидкість обертання	10000 об/хв
Посадка валу	М16
Довжина валу	30 мм
ККД	$\geq 94\%$

Обираємо муфту фланцеву по ГОСТ 20761-80 [15]. Конструкція муфти фланцевої 16-11-11 ГОСТ 20761-80 наведена на рис. 2.12.

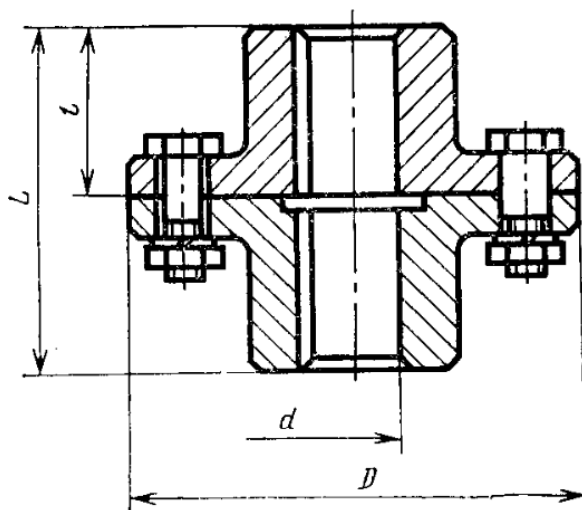


Рис. 2.12 - Муфта фланцева ГОСТ 20761-80 [15]

Параметри данної муфти наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Параметри муфти фланцевої 16-11-11 ГОСТ 20761-80 [15]

Параметр	Значення
Крутний момент T	16 Нм
Діаметр посадки d	11 мм
Діаметр D	80 мм
Довжина полумуфти l	28 мм
Довжина муфти L	60 мм

Для керування електродвигуном обираємо FOC-контролер NS841000 (рис. 2.13; 2.14) [21]. Контролер забезпечує розгін до необхідної частоти обертання ротора накопичувача за заданим законом та підтримання постійної частоти обертання.



Рис. 2.13 - Зовнішній вигляд FOC-контролера NS841000 [21]

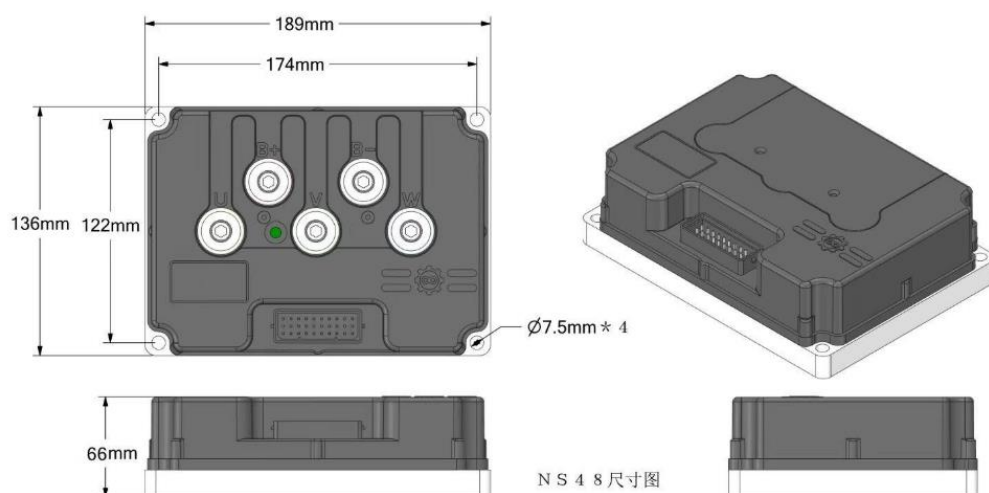


Рис. 2.14 - Схема FOC-контролера NS841000 [21]

Паспортні дані FOC-контролера NS841000 наведені в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Паспортні дані FOC-контролера NS841000 [21]

Параметр	Значення
Вхідна сила струму	1000/450 А
Тип підключення	S48
Робоча напруга	60/72/84 В
Максимальна напруга	100,8 В
Адаптована потужність двигуна	7-10 кВт
Швидкість спрацювання	140 мс
Габарити	189*139*66

Для перетворення кінетичної енергії маховика у електричну використовується електрична машина QSD165D-50. Для перетворення параметрів електричної енергії, що отримується від генератора та має змінну напругу та змінну частоту використовується спеціалізований Grid-tie інвертор, що може працювати із вхідною напругою яка змінюється у широкому діапазоні, а на виході отримувати напругу 220В з частотою 50 Гц. Обираємо інвертор WindKraft GC-1.5K (рис. 2.15) [22].



Рис. 2.15 - Інвертор WindKraft GC-1.5K [22]

Паспортні дані інвертора WindKraft GC-1.5K наведені в таблиці 2.5 [22].

Таблиця 2.5 – Паспортні дані інвертора WindKraft GC-1.5K [22]

Параметр	Значення
Максимальна вхідна напруга	450 В
Максимальна вхідна сила струму	9 А _{dc}
Номінальна вихідна потужність	1,5 кВт
Споживаний струм інвертором	< 10 мА
ККД	≥ 95%

Висновки до розділу 2

В даному розділі було розроблено принципову схему джерела безперебійного живлення, виконано опис її принципу роботи. Були проведені розрахунки характеристик накопичувача кінетичної енергії, а саме: знайдено основні параметри накопичувача кінетичної енергії, виконано розрахунок валу, перевірено його на статичну міцність та опір втомі, виконано розрахунок та підбір підшипників, виконані перевірочні розрахунки їх довговічності. На основі визначених параметрів накопичувача було здійснено підбір обладнання.

3. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ МАХОВИКА

3.1. Опис деталі

Назва деталі: маховик №1

Службове призначення деталі: зберігання кінетичної енергії у накопичувачу кінетичної енергії.

Матеріал деталі: Сталь 40Х

Замовлення: 1 м. п.

3.2. Вибір заготовки

При виборі методу отримання заготовки враховують матеріал деталі, тип виробництва, якість поверхні та її точність. Для нашої деталі найбільш доцільним є метод отримання заготовки через замовлення прокату з круглою формою перерізу.

Замовляємо прокат в компанії ТОВ «ОЛТЕХ» в розмірі 1 м. п. Діаметр прокату – 360 мм (рис. 3.1) [23].



Рис. 3.1. - Сталевий круг 360 мм

						Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.3. Розробка маршрутного технологічного процесу

Для опису маршруту оброблення деталі ідентифікуємо поверхні та операції (рис. 3.2, табл. 3.1):

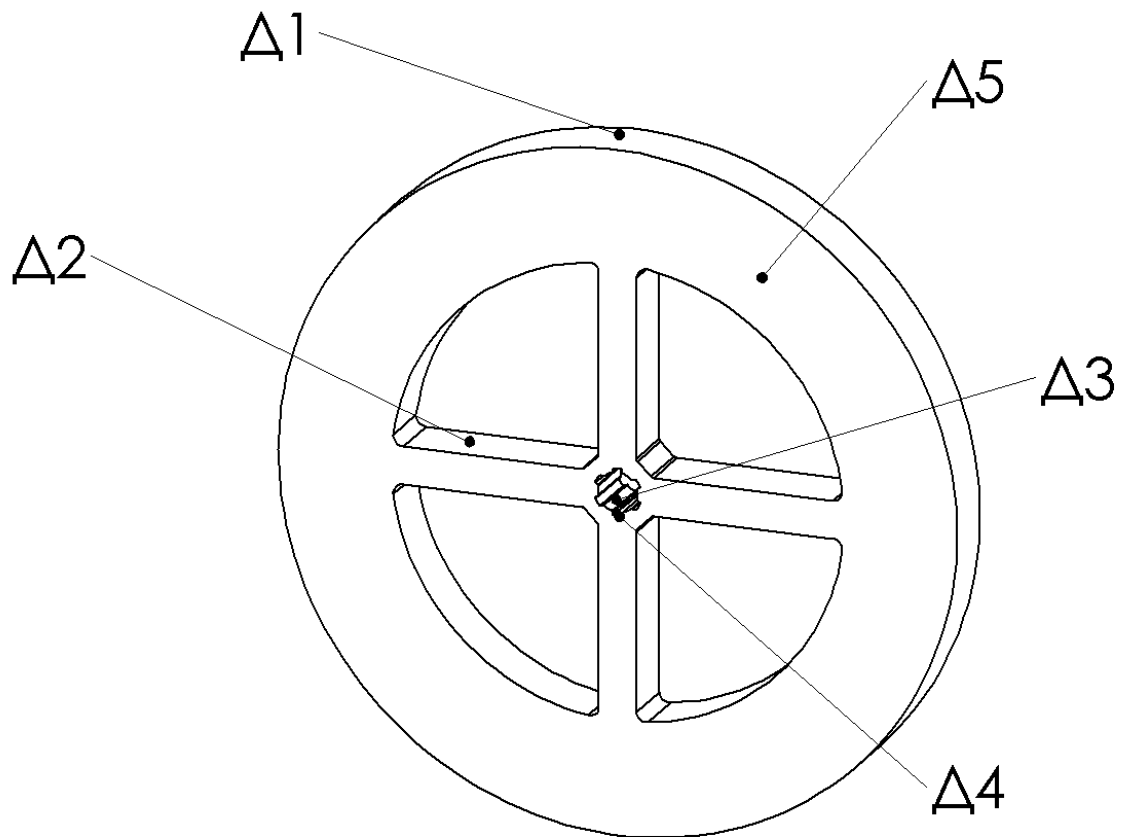


Рис. 3.2. - Нумерація поверхонь деталі

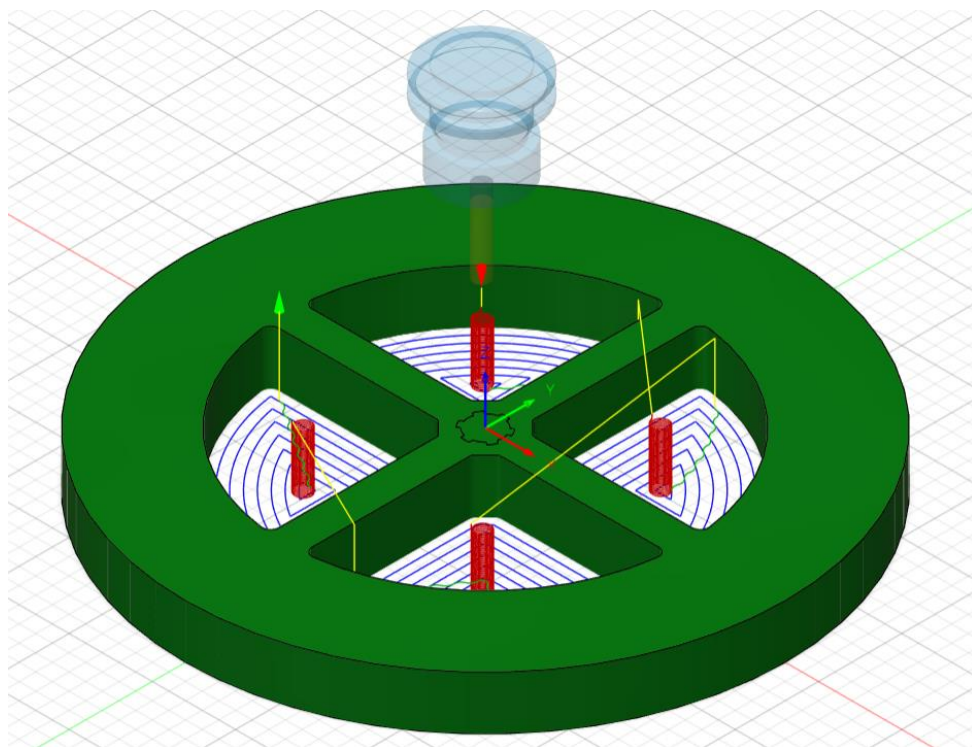
Таблиця 3.1 – Типові технологічні послідовності оброблення поверхонь деталі:

Назва поверхні	Характеристики якості поверхонь		Типова технологічна послідовність оброблення поверхні	Характеристики якості поверхонь після оброблення	
	Точність розмірів	Параметр шорсткості Rz, мкм		Точність розмірів	Параметр шорсткості Rz, мкм

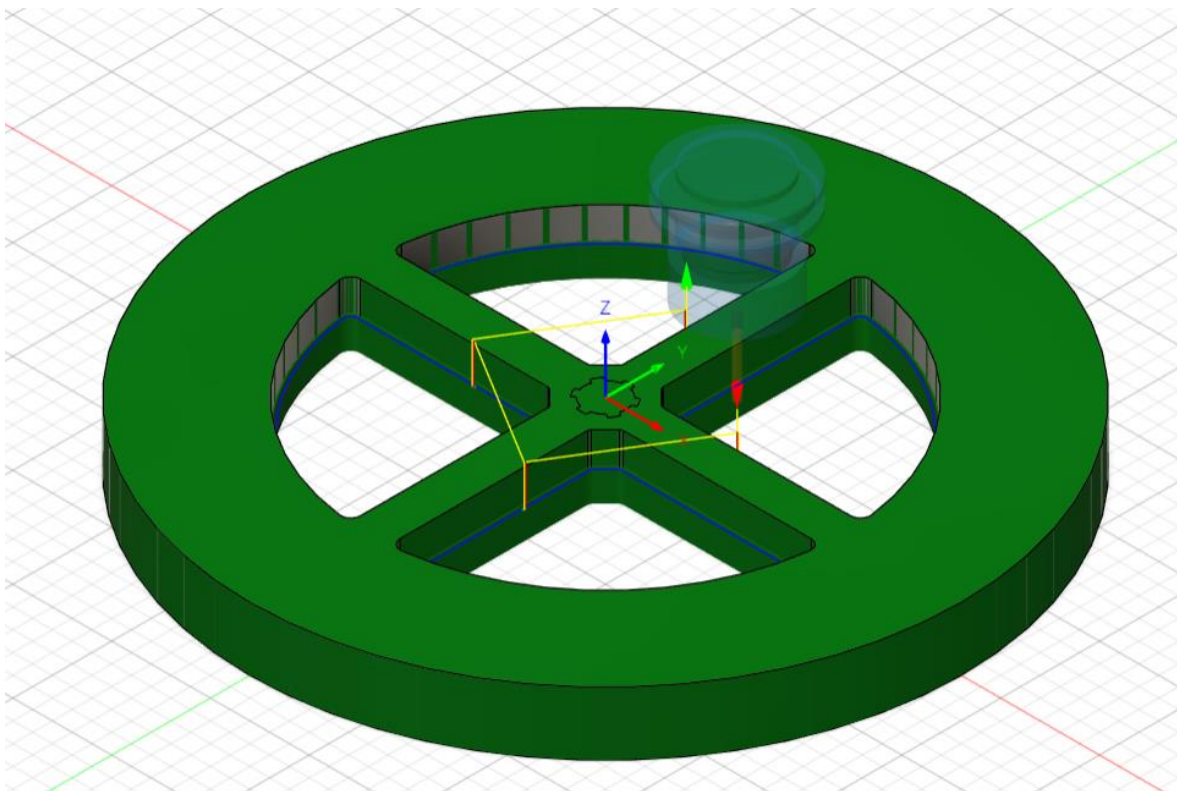
Д1	9	80	Обточування чорнове	10	80
Д2	10	80	Фрезерування чорнове	10	80
Д3	10	80	Фрезерування чорнове	10	80
Д4	10	80	Фрезерування чорнове	10	80
Д5	10	80	Фрезерування чорнове	10	80

Перехід 1. Обточування зовнішньої поверхні

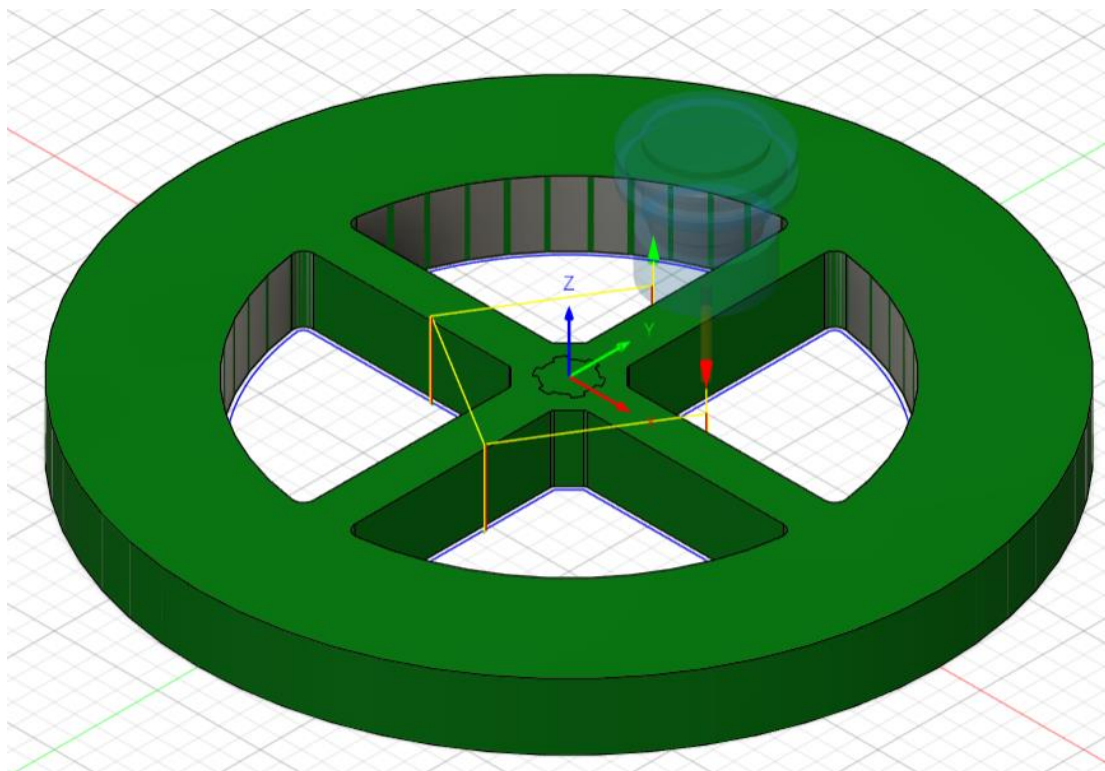
Перехід 2. Фрезерування внутрішніх поверхонь



Перехід 3. Фрезерування внутрішніх поверхонь



Перехід 4. Фрезерування внутрішніх поверхонь

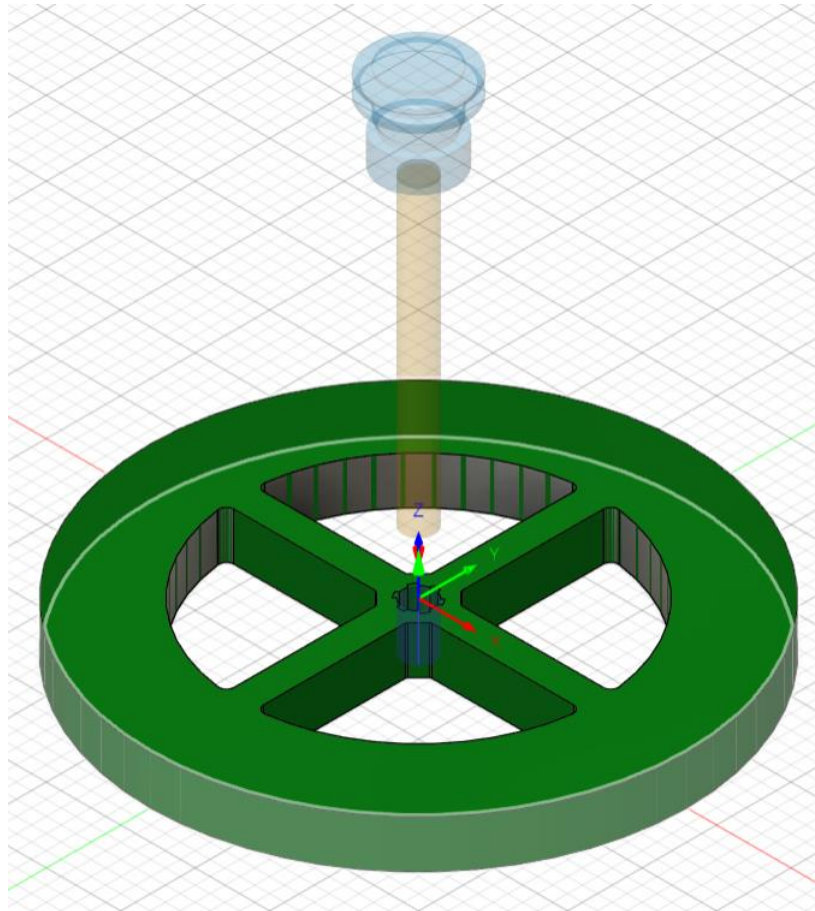


Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

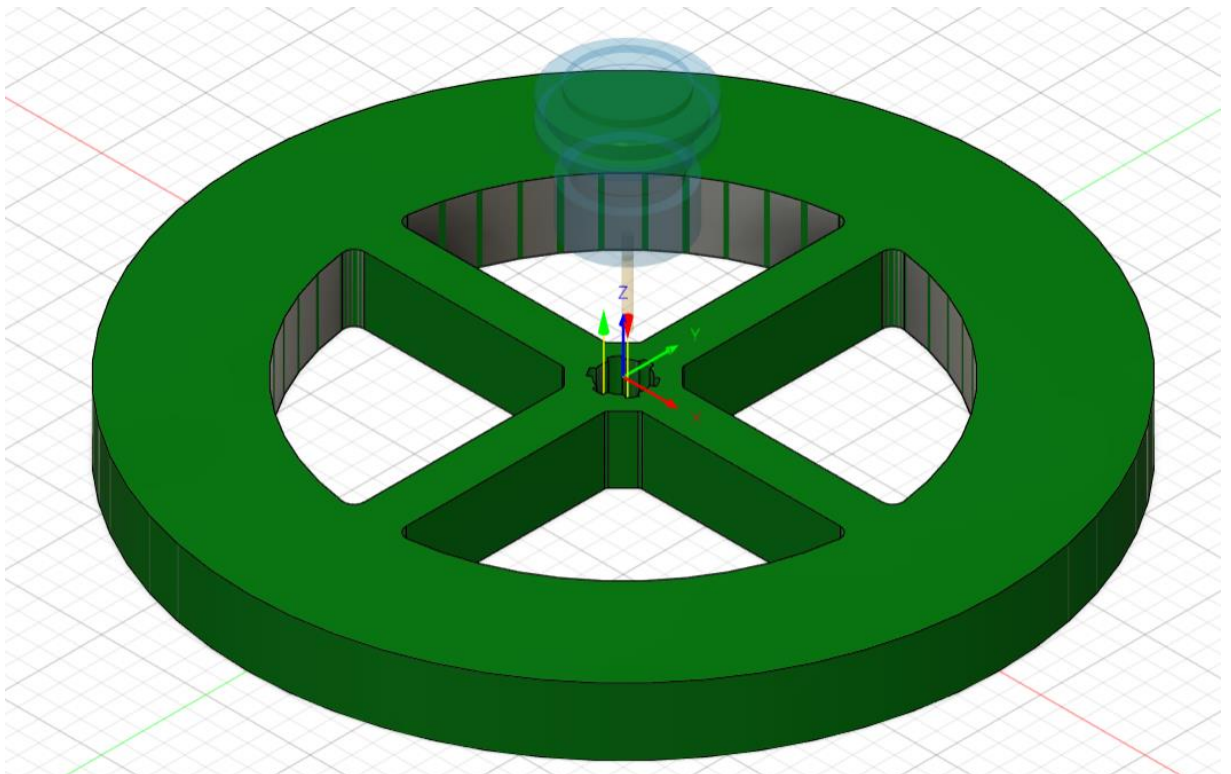
Арк.

66

Перехід 5. Свердління центрального отвору

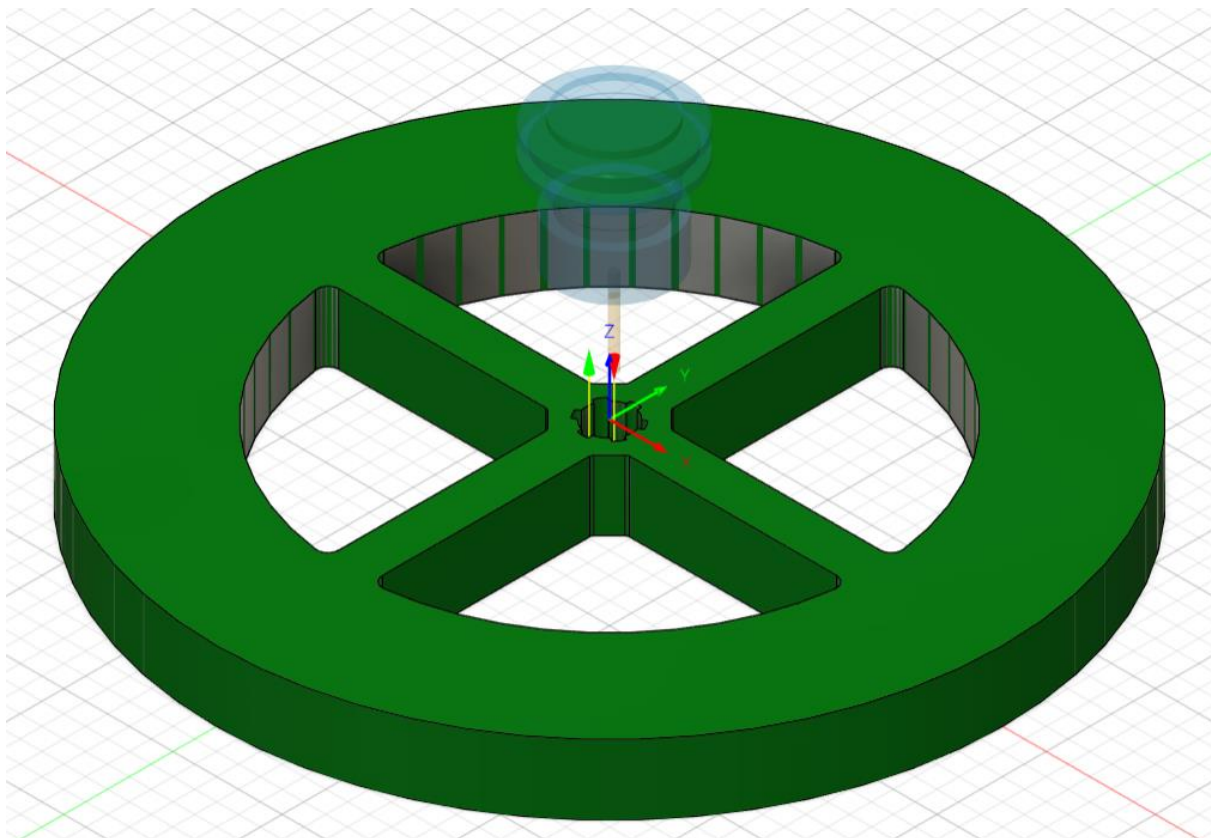


Перехід 6. Розфрезерування отвору

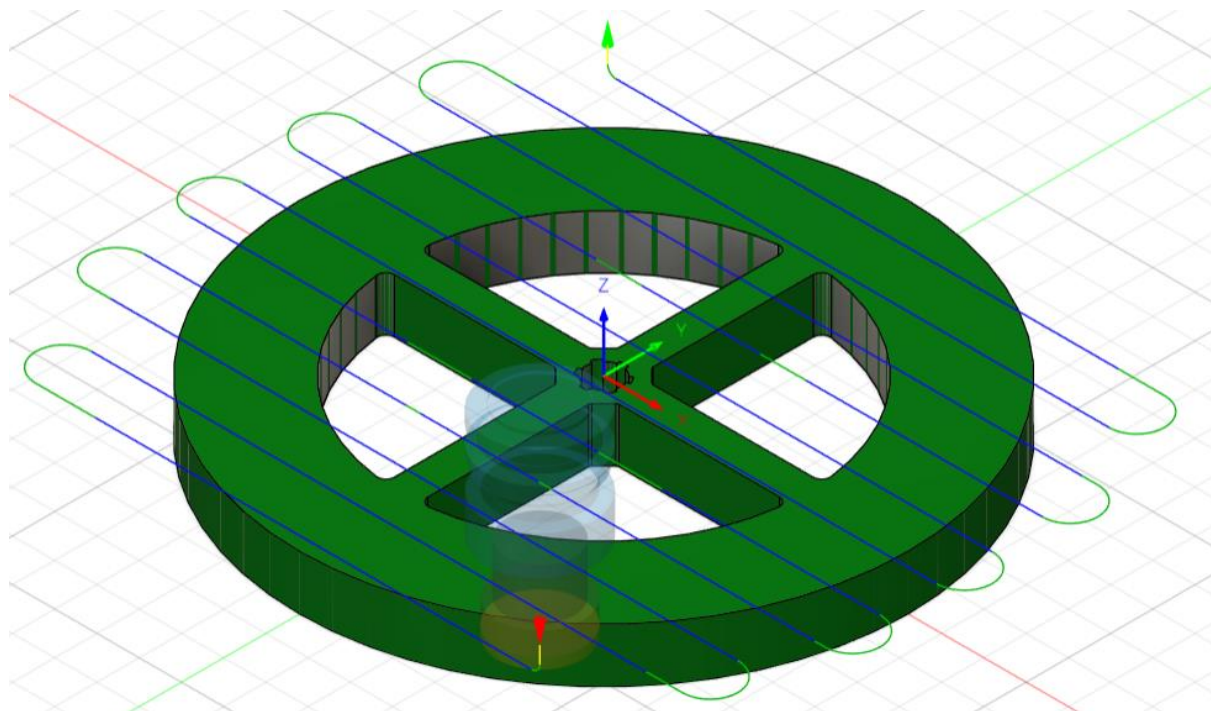


						Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перехід 7. Розфрезерування отвору



Перехід 8. Фрезерування торця



3.4. Оснащення операцій

Обираємо оснащення операцій з каталогу [24]:

Перехід 1

Перехід 2

TypeFlat end mill▼

UnitMillimeters▼

Clockwise spindle rotation☒

Number of flutes3^v

MaterialUnspecified▼

Geometry

Diameter10 mm

Shaft diameter10 mm_{*f_x*}

Overall length100 mm

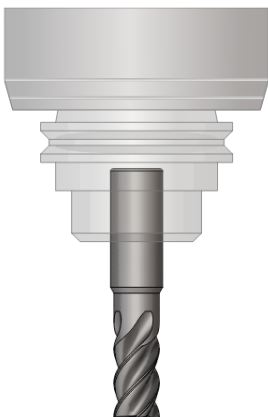
Length below holder50 mm

Shoulder length40 mm

Flute length40 mm

Tool Assembly

Gauge length112.8396 mm_{*f_x*}



Перехід 3

TypeFlat end mill▼

UnitMillimeters▼

Clockwise spindle rotation☒

Number of flutes3^v

MaterialUnspecified▼

Geometry

Diameter4 mm

Shaft diameter4 mm_{*f_x*}

Overall length75 mm

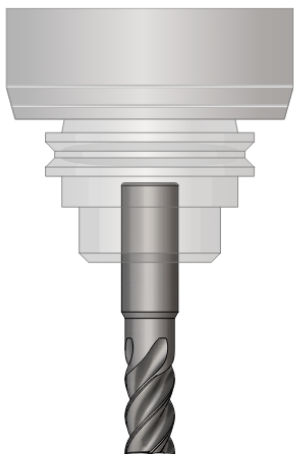
Length below holder40 mm

Shoulder length30 mm

Flute length30 mm

Tool Assembly

Gauge length102.8396 mm_{*f_x*}



Перехід 4

Type

Flat end mill

▼

Unit

Millimeters

▼

Clockwise spindle rotation

☒

Number of flutes

3

^

v

Material

Unspecified

▼

Geometry

Diameter

4 mm

Shaft diameter

4 mm

f_x

Overall length

75 mm

Length below holder

40 mm

Shoulder length

30 mm

Flute length

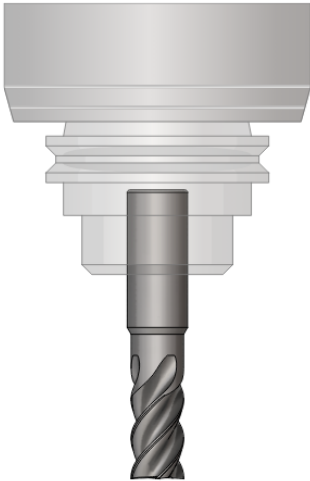
30 mm

Tool Assembly

Gauge length

102.8396 mm

f_x



Перехід 5

Type

Drill

▼

Unit

Millimeters

▼

Clockwise spindle rotation

☒

Number of flutes

1

^

v

Material

Unspecified

▼

Geometry

Diameter

21 mm

Shaft diameter

21 mm

f_x

Tip angle

118 degrees

Overall length

215.08 mm

Length below holder

212.54 mm

Shoulder length

210 mm

Flute length

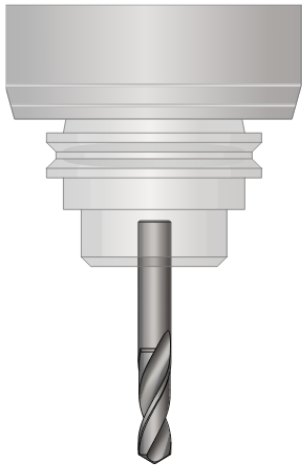
210 mm

Tool Assembly

Gauge length

275.3796 mm

f_x



Перехід 6

TypeFlat end mill

UnitMillimeters

Clockwise spindle rotation☒

Number of flutes3

MaterialUnspecified

Geometry

Diameter10 mm

Shaft diameter10 mmfx

Overall length100 mm

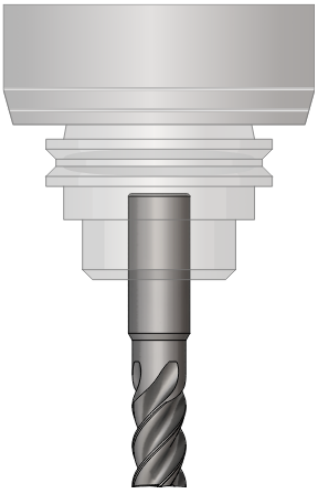
Length below holder50 mm

Shoulder length40 mm

Flute length40 mm

Tool Assembly

Gauge length112.8396 mmfx



Перехід 7

TypeFlat end mill

UnitMillimeters

Clockwise spindle rotation☒

Number of flutes3

MaterialUnspecified

Geometry

Diameter10 mm

Shaft diameter10 mmfx

Overall length100 mm

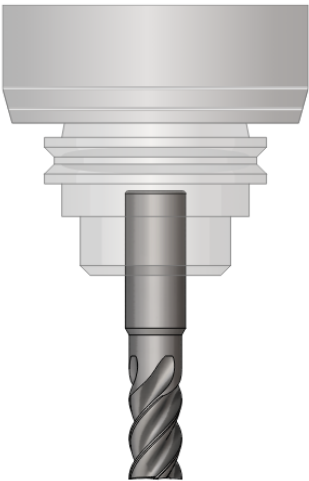
Length below holder50 mm

Shoulder length40 mm

Flute length40 mm

Tool Assembly

Gauge length112.8396 mmfx



Перехід 8

TypeFace mill

UnitMillimeters

Clockwise spindle rotation☒

Number of flutes4

MaterialUnspecified

Geometry

Diameter50 mm

Shaft diameter40 mm

Overall length130 mm

Length below holder50 mm

Shoulder length20 mm

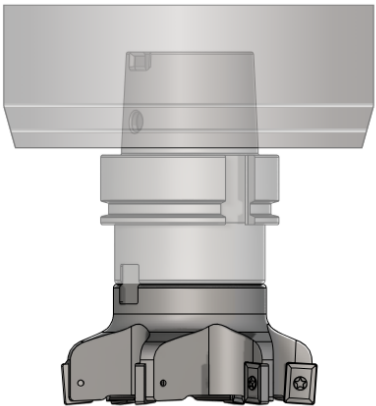
Flute length6 mm

Corner radius0 mm

Taper angle0 degrees

Tool Assembly

Gauge length120.1292 mmfx



Для контролю точності отриманих розмірів використано вимірювальний пристрій:

SARA

Digital sliding calliper

ISO 13385-1

INOX

0,01 mm

inch mm

- Locking screw on top
- High-contrast, easily readable LCD display
- External, internal, depth and step measurements
- Thread table on the back
- Functions: ON/OFF, ZERO, mm/inch
- Supplied with CR2032 battery, no. 548079 6032

500702 0150

Max. length measuring range mm	Jaw length mm	Error limit mm	art.no.	€	DAkkS calibration art.no.	€
100	30	0.03	500702 0100	48,-	072008 D001	16,-
150	40	0.03	500702 0150	72,-	072008 D001	16,-
200	50	0.03	500702 0200	115,-	072008 D001	16,-
300	60	0.04	500702 0300	235,-	072008 D002	21,-

5108

Рис. 3.3 – вимірювальний пристрій

Для виконання технологічних операцій з металообробки використано фрезерний верстат: Hozmann BF 600D (рис.3.4)



Рис. 3.3 - Фрезерний верстат Hozmann BF 600D

Висновки до розділу 3

У цьому розділі було проаналізовано технологічний процес виготовлення деталі «маховик». Як заготовку обрано круглий профіль з сталюого сплаву 40Х. Розроблено маршрутний технологічний процес виготовлення деталі, а також здійснено підбір верстатного обладнання та вимірювальних засобів, необхідних для його реалізації.

						Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Характеристика приміщення

Розроблення джерела безперебійного живлення, побудованого на основі технології накопичення кінетичної енергії, пов'язане з виконанням комплексу робіт з проектування, виготовлення, складання, налагодження та випробування механічних та електротехнічних вузлів. Особливістю розроблюваного пристрою є використання маховикового накопичувача енергії, який забезпечує акумулювання механічної енергії обертання ротора з подальшим її перетворенням в електричну енергію під час аварійного відключення основного джерела живлення.

Відповідно до технічного завдання потужність джерела безперебійного живлення становить 800 Вт при живленні від мережі змінного струму напругою 220 В та частотою 50 Гц, а час автономної роботи складає 4 хвилини. Зазначені параметри визначають склад обладнання та особливості організації безпечних умов праці під час виконання робіт, пов'язаних із виготовленням і експлуатацією даного виробу.

Роботи з виготовлення та складання джерела безперебійного живлення виконуються у виробничому приміщенні машинобудівного або приладобудівного підприємства, оснащеному необхідним технологічним обладнанням. У межах виробничої ділянки здійснюються операції механічної обробки багатоступінчастого валу, виготовлення елементів ротора, монтаж підшипникових вузлів, встановлення електродвигуна, генератора та електронної системи керування.

Крім того, виконуються роботи з перевірки працездатності вузлів, балансування ротора, електричних випробувань та контролю параметрів роботи системи. Для забезпечення належного рівня безпеки приміщення повинно відповідати вимогам чинних нормативних документів щодо охорони праці, електробезпеки, пожежної безпеки та виробничої санітарії.

У процесі виготовлення джерела безперебійного живлення використовуються різні види обладнання, зокрема токарні та свердлильні

						Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

верстати, шліфувальне обладнання, електромонтажний інструмент, вимірювальні прилади та випробувальні стенди. Наявність такого обладнання формує комплекс виробничих факторів, які можуть впливати на працівників.

До них належать механічні небезпеки, пов'язані з рухомими частинами верстатів, можливість травмування металевою стружкою, ризик контакту з обертовими деталями, а також вплив електричного струму під час монтажу та перевірки електронних компонентів. Враховуючи те, що в конструкції пристрою застосовується високошвидкісний ротор, додаткову увагу необхідно приділити заходам захисту від наслідків можливого руйнування його елементів.

Одним із найбільш важливих факторів безпеки є наявність у складі системи маховикового накопичувача енергії. Принцип роботи таких систем ґрунтується на накопиченні енергії у вигляді кінетичної енергії обертання. Відомо, що сучасні маховикові накопичувачі можуть працювати при швидкостях обертання від декількох тисяч до десятків тисяч обертів за хвилину залежно від конструкції та призначення.

Навіть для порівняно малопотужних систем значення накопиченої енергії може бути достатнім для створення небезпечних механічних навантажень у разі аварійної ситуації. Саме тому всі роботи, пов'язані з випробуванням ротора, повинні проводитися із застосуванням захисних кожухів, екранів та систем контролю параметрів роботи.

Виробниче приміщення, у якому здійснюється складання та випробування джерела безперебійного живлення, повинно забезпечувати нормативні параметри мікроклімату. Для категорії робіт середньої важкості температура повітря в холодний період року повинна підтримуватися в межах 18–22 °С, а в теплий період року – 20–25 °С.

Відносна вологість повітря рекомендується в межах 40–60 %, а швидкість руху повітря не повинна перевищувати значень, встановлених санітарними нормами. Дотримання зазначених параметрів сприяє збереженню працездатності персоналу, зниженню стомлюваності та забезпеченню необхідної точності виконання складальних і налагоджувальних операцій.

						Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Відстані між обладнанням повинні забезпечувати безпечне пересування працівників та вільний доступ до органів керування і засобів аварійного вимкнення. Особливо важливим є забезпечення безпечних проходів у зонах, де здійснюється транспортування або монтаж масивних елементів конструкції маховикового накопичувача.

Під час роботи електродвигуна, генератора та підшипникових вузлів виникають шум і вібрації, які належать до шкідливих виробничих факторів. За даними досліджень, тривалий вплив шуму рівнем понад 80 дБ може негативно впливати на слухову систему людини та знижувати концентрацію уваги. Для мінімізації впливу шуму доцільно застосовувати балансування ротора, вібропоглинальні опори, еластичні муфти та шумоізолюючі матеріали. Контроль технічного стану підшипників також дозволяє зменшити рівень вібрацій та підвищити загальну надійність роботи системи.

Особливу увагу необхідно приділити електробезпеці, оскільки джерело безперебійного живлення працює від мережі змінного струму напругою 220 В. Навіть короточасний контакт людини зі струмопровідними частинами може призвести до важких наслідків. Під час складання та випробувань використовуються силові електронні компоненти, випрямлячі, інвертори та блоки керування, які можуть перебувати під напругою. Тому всі металеві корпуси обладнання повинні бути заземлені, а роботи з електричними колами повинні виконуватися тільки після відключення живлення та перевірки відсутності напруги.

У процесі роботи джерела безперебійного живлення частина електричної енергії перетворюється на теплову. Основними джерелами тепловиділення є електродвигун, генератор, силові транзистори інвертора та елементи системи керування.

Перегрів електронних компонентів може призвести до зниження ефективності роботи пристрою, передчасного старіння ізоляції та виникнення аварійних режимів. Для забезпечення надійної роботи обладнання необхідно

						Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

передбачити ефективну систему охолодження та вентиляції, яка забезпечуватиме відведення надлишкового тепла від найбільш навантажених вузлів конструкції.

Пожежна безпека також є важливим аспектом експлуатації виробничого приміщення. Причинами виникнення пожеж можуть бути короткі замикання, перевантаження електромережі, несправність електрообладнання або перегрів силових компонентів. Враховуючи наявність електронної апаратури та ізоляційних матеріалів, приміщення повинно бути оснащено первинними засобами пожежогасіння, системою оповіщення та відповідними знаками безпеки. Для гасіння електрообладнання доцільно використовувати вуглекислотні або порошкові вогнегасники, які не пошкоджують електронні компоненти та не проводять електричний струм.

4.2 Електробезпека

Під час розроблення, складання, налагодження та випробування джерела безперебійного живлення, побудованого на основі технології накопичення кінетичної енергії, одним із найважливіших аспектів забезпечення безпечних умов праці є електробезпека. Розроблюваний пристрій працює від мережі змінного струму напругою 220 В і частотою 50 Гц та містить у своєму складі електродвигун, генератор, силові електронні перетворювачі, блок керування, датчики контролю параметрів роботи та допоміжні електричні кола.

Усі перелічені елементи під час експлуатації можуть становити потенційну небезпеку для персоналу у випадку пошкодження ізоляції, виникнення короткого замикання, пробою силових компонентів або порушення правил експлуатації обладнання.

За статистичними даними міжнародних організацій з охорони праці, електротравми займають відносно невелику частку серед загальної кількості виробничих травм, проте характеризуються високим рівнем тяжкості наслідків.

Частка смертельних випадків від дії електричного струму в промисловості в багатьох країнах становить від 8 до 15 % від загальної кількості смертельних виробничих травм. Особливу небезпеку становлять роботи, пов'язані з

						Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

налагодженням електрообладнання, проведенням вимірювань та випробувань, коли можливий безпосередній контакт людини зі струмопровідними частинами обладнання.

Небезпечний вплив електричного струму на організм людини залежить від багатьох факторів, серед яких основними є величина струму, тривалість його дії, шлях проходження через тіло людини та фізіологічний стан потерпілого. Вважається, що струм величиною до 1 мА практично не відчувається людиною.

При значеннях 5–7 мА виникають больові відчуття та мимовільне скорочення м'язів. Струм 10–15 мА може спричинити втрату можливості самостійно відпустити провідник. При величині струму понад 50 мА значно зростає ризик фібриляції серця, а струм понад 100 мА за тривалої дії становить безпосередню загрозу життю людини [25].

Під час роботи над джерелом безперебійного живлення небезпека ураження електричним струмом може виникати на етапі складання електронних модулів, підключення системи керування, перевірки інвертора, випрямляча, генератора та інших силових елементів. Додатковий ризик створює наявність накопиченої енергії в конденсаторах силових кіл, які можуть зберігати небезпечний рівень напруги навіть після відключення пристрою від мережі. Саме тому перед початком будь-яких робіт необхідно здійснювати контроль відсутності напруги за допомогою відповідних вимірювальних приладів.

Для забезпечення безпеки персоналу всі струмопровідні частини обладнання повинні бути надійно ізольовані від металевого корпусу пристрою. Ізоляція електричних провідників повинна відповідати робочій напрузі системи та забезпечувати необхідний рівень електричної міцності протягом усього терміну експлуатації. Особливу увагу необхідно приділяти місцям проходження кабелів через металеві конструкції корпусу, де можливе механічне пошкодження ізоляційного покриття. Для запобігання таким випадкам застосовуються спеціальні захисні втулки, кабельні вводи та ізоляційні прокладки.

Одним із найбільш ефективних заходів електробезпеки є використання захисного заземлення. У конструкції джерела безперебійного живлення всі

						Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

металеві частини корпусу, які можуть опинитися під напругою внаслідок пошкодження ізоляції, повинні бути приєднані до системи захисного заземлення.

Принцип дії заземлення полягає у створенні кола з малим електричним опором, через яке струм замикання проходить безпосередньо до землі, забезпечуючи спрацювання автоматичних захисних пристроїв. Завдяки цьому значно зменшується напруга дотику на металевих частинах обладнання та знижується ризик ураження людини електричним струмом.

Для підвищення рівня безпеки в електричній схемі необхідно передбачити застосування автоматичних вимикачів та пристроїв захисного відключення. Автоматичні вимикачі забезпечують захист від перевантажень та коротких замикань, тоді як пристрої захисного відключення контролюють струми витоку та вимикають живлення у випадку виникнення небезпечної ситуації. Практика експлуатації електроустановок показує, що використання пристроїв захисного відключення з номінальним диференційним струмом спрацювання 30 мА дозволяє суттєво знизити ризик тяжких електротравм під час експлуатації обладнання.

Під час випробувань джерела безперебійного живлення необхідно враховувати особливості роботи маховикового накопичувача енергії. У процесі функціонування електродвигун розганяє ротор до розрахункової швидкості обертання, після чого накопичена кінетична енергія може використовуватися для живлення генератора.

У разі аварійного вимкнення електроживлення або виникнення несправності в системі керування можливе утворення перехідних процесів, які супроводжуються зміною напруги та струму в електричних колах. Тому система керування повинна забезпечувати контроль параметрів мережі, захист від перевантаження, перенапруги та коротких замикань.

Важливим елементом організації безпечної роботи є правильне використання засобів індивідуального захисту. Під час виконання електромонтажних робіт працівники повинні використовувати діелектричні рукавички, інструмент з ізольованими ручками, захисні окуляри та спеціальне

						Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

взуття. Для проведення вимірювань і перевірки електричних параметрів необхідно застосовувати сертифіковані прилади, які пройшли відповідну перевірку та калібрування. Забороняється використовувати пошкоджений інструмент або обладнання з несправною ізоляцією.

Організаційні заходи електробезпеки передбачають проведення вступного, первинного та періодичного інструктажів з охорони праці, навчання персоналу правилам безпечної експлуатації електроустановок та перевірку знань працівників. До виконання робіт допускаються лише особи, які пройшли відповідне навчання та мають необхідну групу допуску з електробезпеки. Усі роботи, пов'язані з ремонтом або налагодженням електрообладнання, повинні виконуватися відповідно до затверджених інструкцій та технологічних регламентів.

4.3 Пожежна безпека

Під час проєктування, виготовлення та експлуатації джерела безперебійного живлення, побудованого на основі технології накопичення кінетичної енергії, питання пожежної безпеки мають особливе значення, оскільки конструкція пристрою поєднує механічні та електротехнічні системи, що працюють під електричним навантаженням. До складу розроблюваного обладнання входять електродвигун, генератор, силова електроніка, система керування, кабельна продукція, підшипникові вузли та маховиковий накопичувач енергії.

Усі зазначені елементи під час експлуатації можуть бути джерелами тепловиділення, а за певних умов – причиною виникнення пожежонебезпечних ситуацій. Відповідно до сучасних вимог охорони праці та пожежної безпеки при створенні такого обладнання необхідно передбачати комплекс організаційних та технічних заходів, спрямованих на запобігання виникненню пожеж і мінімізацію їх наслідків.

Аналіз причин виникнення пожеж у промисловості свідчить, що значна частина загорянь пов'язана саме з несправністю електрообладнання. За даними міжнародних досліджень у сфері пожежної безпеки, частка пожеж, спричинених

						Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

короткими замиканнями, перевантаженням електричних мереж та несправністю електричних пристроїв, може перевищувати 30–40 % від загальної кількості пожеж на виробничих об'єктах [25].

Для обладнання, що містить електронні системи керування та силові перетворювачі, ризик виникнення аварійних режимів додатково підвищується через значні струмові навантаження та теплові процеси, які супроводжують роботу силових компонентів.

Основними джерелами пожежної небезпеки в розроблюваному джерелі безперебійного живлення є електричні кола живлення, силові транзистори інвертора, випрямлячі, кабельні з'єднання та електродвигун приводу маховикового накопичувача енергії. У разі виникнення короткого замикання або перевищення допустимого навантаження температура окремих елементів може різко зростати, що створює передумови для займання ізоляційних матеріалів. Особливо небезпечними є приховані дефекти контактних з'єднань, оскільки підвищений перехідний опір у місці контакту призводить до локального нагрівання та поступового руйнування ізоляції.

Додаткову небезпеку становить система накопичення кінетичної енергії. Під час роботи маховикового накопичувача відбувається перетворення електричної енергії на механічну та навпаки. У разі виникнення аварійних режимів роботи електродвигуна або генератора можливі перевантаження електричних кіл, що супроводжуються виділенням значної кількості тепла. Хоча сам маховик не є джерелом займання, його руйнування або заклинювання підшипникових вузлів можуть спричинити перегрів окремих елементів конструкції. Саме тому система повинна бути обладнана засобами автоматичного контролю температури та аварійного відключення.

Пожежна безпека виробничого приміщення багато в чому визначається правильним вибором матеріалів, які використовуються під час виготовлення конструкції. Для корпусу джерела безперебійного живлення доцільно застосовувати металеві матеріали, які не підтримують горіння та мають високі показники вогнестійкості. Кабельна продукція повинна відповідати вимогам

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

щодо пожежної безпеки та мати ізоляцію зі зниженим димо- та газовиділенням. Використання негорючих або важкогорючих матеріалів дозволяє значно зменшити швидкість поширення полум'я у випадку виникнення пожежі.

Важливим елементом забезпечення пожежної безпеки є система вентиляції. У процесі роботи електронних компонентів, електродвигуна та генератора виділяється теплова енергія, яка повинна своєчасно відводитися з робочої зони. Недостатній повітрообмін призводить до підвищення температури обладнання та зменшення строку його служби. За даними виробників силової електроніки, підвищення температури експлуатації лише на 10 °C може скоротити ресурс окремих електронних компонентів майже вдвічі. Саме тому підтримання нормативного температурного режиму одночасно підвищує надійність обладнання та знижує ризик виникнення пожежі.

Для запобігання аварійним ситуаціям електрична схема джерела безперебійного живлення повинна містити комплекс захисних пристроїв. До таких пристроїв належать автоматичні вимикачі, плавкі запобіжники, пристрої захисту від перенапруги, датчики температури та системи аварійного вимкнення. У разі перевищення допустимих параметрів роботи захисна автоматика повинна забезпечувати миттєве відключення живлення та переведення обладнання в безпечний режим роботи. Подібні технічні рішення широко застосовуються у сучасних системах безперебійного живлення та значно підвищують рівень їх експлуатаційної безпеки.

Для забезпечення належного рівня пожежної безпеки виробниче приміщення повинно бути оснащено первинними засобами пожежогасіння. Оскільки основна частина обладнання працює під електричною напругою, використання водяних засобів пожежогасіння є неприпустимим до повного знеструмлення установки.

Найбільш ефективними для гасіння електрообладнання є вуглекислотні та порошкові вогнегасники. Вуглекислотні вогнегасники не залишають слідів після застосування та не пошкоджують електронні компоненти, що робить їх особливо придатними для використання в приміщеннях з електротехнічним обладнанням.

						Арк.
						82
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основні джерела пожежної небезпеки під час експлуатації джерела безперебійного живлення, а також можливі причини займання та заходи захисту наведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Основні джерела пожежної небезпеки під час експлуатації джерела безперебійного живлення

Джерело небезпеки	Можлива причина займання	Заходи захисту
Силові електронні компоненти	Перегрів, коротке замикання	Автоматичний захист, охолодження
Кабельні лінії	Пошкодження ізоляції	Контроль стану ізоляції
Електродвигун	Перевантаження, перегрів	Тепловий захист
Генератор	Перевищення навантаження	Контроль струму та температури
Контактні з'єднання	Підвищений перехідний опір	Періодичний технічний огляд
Система керування	Несправність електроніки	Захист від перенапруги

Не менш важливим напрямом забезпечення пожежної безпеки є організаційна робота. Працівники повинні проходити інструктажі з пожежної безпеки, знати порядок дій у разі виникнення пожежі та вміти користуватися первинними засобами пожежогасіння. На виробничій ділянці необхідно розміщувати схеми евакуації, знаки пожежної безпеки та інформацію про місця розташування вогнегасників. Усі проходи до евакуаційних виходів повинні бути вільними від сторонніх предметів та обладнання.

Під час виконання робіт з виготовлення багатоступінчастого валу та інших металевих деталей можуть застосовуватися мастильні матеріали, технічні рідини та допоміжні речовини. Їх зберігання повинно здійснюватися у спеціально відведених місцях відповідно до встановлених вимог пожежної безпеки.

Не допускається накопичення промасленого ганчір'я, стружки та інших горючих відходів безпосередньо біля робочих місць. Регулярне прибирання виробничих приміщень є важливим профілактичним заходом щодо запобігання пожежам.

4.4 Мікроклімат

Одним із найважливіших чинників забезпечення безпечних та комфортних умов праці під час виготовлення, складання, налагодження та випробування джерела безперебійного живлення на основі технології накопичення кінетичної енергії є підтримання нормативних параметрів мікроклімату виробничого приміщення. Від параметрів повітряного середовища безпосередньо залежать працездатність персоналу, точність виконання монтажних операцій, надійність функціонування електронного обладнання та загальний рівень безпеки виробничого процесу (табл 4.2).

Для даного проекту питання мікроклімату є особливо актуальним, оскільки конструкція розроблюваного пристрою містить електродвигун, генератор, систему керування, силові електронні компоненти та вузли накопичення кінетичної енергії, які під час роботи виділяють певну кількість теплової енергії.

Під мікрокліматом виробничого приміщення розуміють сукупність фізичних параметрів внутрішнього повітряного середовища, до яких належать температура повітря, відносна вологість, швидкість руху повітря та інтенсивність теплового випромінювання. Саме ці показники визначають тепловий стан організму людини та впливають на її самопочуття протягом робочого дня.

За результатами численних досліджень встановлено, що відхилення параметрів мікроклімату від нормативних значень може призводити до підвищення стомлюваності працівників на 20–40 %, зниження продуктивності праці на 10–20 % та збільшення кількості виробничих помилок, особливо під час виконання точних складально-монтажних робіт.

Для виробничих приміщень, у яких виконуються роботи з монтажу та налагодження електромеханічного обладнання, відповідно до вимог санітарних

						Арк.
						84
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

норм рекомендуються оптимальні параметри мікроклімату. У холодний період року температура повітря повинна підтримуватися в межах від 18 до 22 °С, а в теплий період року – від 20 до 25 °С. Відносна вологість повітря повинна знаходитися в межах 40–60 %, а швидкість руху повітря не перевищувати 0,1–0,3 м/с залежно від пори року. Саме такі умови забезпечують комфортне теплове самопочуття працівників та створюють сприятливі умови для роботи електронного обладнання.

Під час виготовлення та випробування джерела безперебійного живлення джерелами тепловиділення є електродвигун приводу маховика, електричний генератор, силові напівпровідникові елементи інвертора, випрямляча та системи керування.

Навіть при порівняно невеликій потужності установки, що відповідно до технічного завдання становить 800 Вт, частина споживаної енергії неминуче перетворюється на тепло. Залежно від коефіцієнта корисної дії електричних машин та електронних перетворювачів втрати можуть становити від 5 до 15 % від загальної потужності системи. Це означає, що під час роботи обладнання в приміщення може виділятися кілька десятків ват теплової енергії, які необхідно ефективно відводити за допомогою вентиляції.

Особливу увагу необхідно приділити температурному режиму електронних компонентів. Відомо, що підвищення робочої температури напівпровідникових елементів негативно впливає на їх довговічність. За даними виробників електронних компонентів, збільшення температури експлуатації на кожні 10 °С може зменшувати термін служби окремих електронних вузлів майже удвічі. Саме тому підтримання оптимального температурного режиму є не лише питанням комфорту працівників, але й важливим фактором забезпечення надійності роботи розроблюваного джерела безперебійного живлення.

Відносна вологість повітря також має значний вплив на безпеку та якість виробничого процесу. Надмірно сухе повітря сприяє накопиченню зарядів статичної електрики, які можуть негативно впливати на роботу електронних компонентів та чутливих елементів системи керування. Разом із тим надмірна

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		85

вологість створює умови для утворення конденсату на поверхні електронних плат і струмопровідних частин обладнання. Це може призвести до погіршення ізоляційних властивостей матеріалів, збільшення струмів витоку та виникнення аварійних режимів роботи електрообладнання.

Важливим параметром мікроклімату є швидкість руху повітря. Недостатній повітрообмін призводить до накопичення надлишкового тепла та погіршення умов праці. З іншого боку, надмірна швидкість руху повітря може викликати відчуття дискомфорту, особливо в холодний період року.

Для виробничих приміщень, де виконуються роботи середньої важкості, рекомендоване значення швидкості руху повітря зазвичай становить від 0,1 до 0,3 м/с. Такі показники дозволяють забезпечити ефективне відведення тепла без створення протягів та негативного впливу на працівників.

Для підтримання нормативних параметрів мікроклімату у виробничому приміщенні повинна бути передбачена система вентиляції. Найбільш доцільним рішенням для приміщень даного типу є використання припливно-витяжної вентиляції, яка забезпечує постійне оновлення повітряного середовища.

Система вентиляції повинна компенсувати тепловиділення від обладнання та забезпечувати видалення надлишкового тепла. При цьому необхідно враховувати як теплові надходження від самого джерела безперебійного живлення, так і тепловиділення від освітлювальних приладів, персоналу та іншого технологічного обладнання.

Рекомендовані параметри мікроклімату для виробничого приміщення у холодний та теплий періоди року наведені у таблиці 4.2.

Важливим фактором забезпечення нормативного мікроклімату є правильне планування розміщення обладнання у виробничому приміщенні. Джерела тепловиділення доцільно розташовувати таким чином, щоб не створювати локальних зон перегріву.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		86

Таблиця 4.2 – Рекомендовані параметри мікроклімату для виробничого приміщення

Параметр	Холодний період року	Теплий період року
Температура повітря, °С	18–22	20–25
Відносна вологість, %	40–60	40–60
Швидкість руху повітря, м/с	до 0,2	до 0,3
Атмосферний тиск, кПа	84–106	84–106

Електродвигун, генератор та силові електронні модулі повинні мати достатній простір для циркуляції повітря та доступу обслуговуючого персоналу. Крім того, необхідно уникати розміщення обладнання поблизу опалювальних приладів або ділянок з прямим сонячним випромінюванням, оскільки це може призвести до додаткового підвищення температури.

Висновки до розділу 4

У розділі охорони праці було проаналізовано основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, що можуть виникати під час виготовлення, складання, налагодження та експлуатації джерела безперебійного живлення на основі технології накопичення кінетичної енергії. Розглянуто вимоги до організації безпечних умов праці, заходи електробезпеки, пожежної безпеки, забезпечення нормативних параметрів мікроклімату та виробничого освітлення.

Виконані розрахунки та запропоновані технічні рішення дозволяють створити безпечні умови праці для персоналу, знизити ризик виникнення аварійних ситуацій, підвищити надійність роботи обладнання та забезпечити відповідність виробничого приміщення вимогам чинних нормативних документів з охорони праці та виробничої безпеки.

						Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		88

ВИСНОВКИ

У процесі виконання роботи проведено аналіз публікацій за тематикою системи безперебійного електроживлення, у тому числі ті, що накопичують кінетичну енергію та використовують її для генерації електроенергії. Розглянуто особливості функціонування таких систем, проаналізовано їх технічні характеристики, а також визначено перспективи застосування сумісно із пристроями, до яких висуваються підвищені вимоги до надійного електропостачання.

У рамках проєкту розроблено конструктивне рішення джерела безперебійного живлення з маховиковим накопичувачем енергії та виконано проєктування його функціональної та електричної схеми. Запропоноване технічне рішення забезпечує підтримання живлення навантаження під час аварійних відключень мережі завдяки перетворенню накопиченої механічної енергії обертання в електричну.

Проведено інженерні розрахунки основних параметрів системи, зокрема визначені основні параметри накопичувача кінетичної енергії, проведено розрахунки валу та підшипників. Отримані результати використані для вибору компонентів та подальшого проєктування технічного рішення накопичувача енергії.

На основі результатів проведених розрахунків здійснено проєктування основних конструктивних елементів пристрою, зокрема валу, маховиків та корпусу.

Особливу увагу приділено забезпеченню механічної міцності вузлів, енергетичної ефективності та забезпечення вимог із безаварійної експлуатації обладнання.

У роботі розглянуто питання розробки технології виготовлення ключових деталей конструкції, а також виконано аналіз вимог охорони праці та заходів безпеки, яких необхідно дотримуватися під час виготовлення, монтажу й експлуатації розробленого джерела безперебійного живлення.

						Арк.
						89
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bezpeka-Shop. Як працюють джерела безперебійного живлення (ДБЖ) [електронний ресурс]
https://www.bezpeka-shop.com/ua/blog/obzor/kak-rabotayut-istochniki-bespereboynogo-pitaniya-ibp/?srsltid=AfmBOoqZKlzAkK9De_w_sNTUbVzwGtYiKoQbaqYficAf0ggZYzwQPstu
2. Вікіпедія. Джерело безперебійного живлення [електронний ресурс]
https://uk.wikipedia.org/wiki/Джерело_безперебійного_живлення
3. Вікіпедія. Flywheel energy storage [електронний ресурс]
https://en.wikipedia.org/wiki/Flywheel_energy_storage
4. Електронний посібник з дисципліни: Деталі машин для студентів напряму підготовки 6.50502 “Інженерна механіка” денної скороченої форми навчання [електронний ресурс]
https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/Деталі%20машин%20ЕЛП%202016/page52.html
5. Li, Xiaojun & Palazzolo, Alan. (2021). A review of flywheel energy storage systems: state of the art and opportunities.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.05224>
6. Акумулятор кінетичної енергії. Патент України № 136897, МПК H02J15/00 Струтинський С.В. Заявл. 04.04.2019, № u201903392, Опубл. 10.09.2019, Бюл. № 17
7. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: / Под ред. И. Н. Жестковой. — М. : Машиностроение, 2001. — 920 с. Том 1.
8. Вікіпедія. Вальниця кочення [електронний ресурс]
https://uk.wikipedia.org/wiki/Вальниця_кочення#Класифікація
9. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: / Под ред. И. Н. Жестковой. — М. : Машиностроение, 2001. — 920 с. Том 2.

						Арк.
						90
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. Веркович Г.А. Справочник конструктора точного машиностроения: /Веркович Г.А и др. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1989. - 792 с. 25
11. Деталі машин, теорія механізмів і основи взаємозамінності. Машинні вали (осі) та їхні опори : навчальний посібник для студентів механічних спеціальностей / С. Г. Карнаух, М. Г. Таровик. – Краматорськ : ДДМА, 2020. – 100 с
12. Допуски, посадки та технічні вимірювання. Практикум. Частина 1: 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.
13. Курмаз, Л. В. Детали машин. Проектирование : справочное учебно-методическое пособие / Л. В. Курмаз, А. Т. Скойбеда. — М. : Высшая школа, 2004. — 309 с.
14. Малащенко В. О. Деталі машин. Конспект лекцій : підручник / В. О. Малащенко. — Львів : «Новий Світ-2000», 2020. — 193[3] с.
15. Малащенко В.О., Янків В.В. Деталі машин. Курсове проектування: Навчальний посібник. – Львів: “Новий Світ-2000”, 2004. – 232 с.
16. Маховиковий накопичувач енергії для її тривалого зберігання. Патент України № 112759, МПК H02J15/00/ Стогнієнко В.Г. Заявл. 18.02.2013, № a201302008, Опубл. 25.10.2016, Бюл. № 20.
17. Опір матеріалів : підручник / Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка, Е. С. Уманський ; за ред. Г. С. Писаренка. – 2-ге вид., допов. і переробл. – Київ : Вища шк., 2004. – 655 с.
18. Писаренко Г.С. «Опір матеріалів: Підручник», 2-ге вид., допов. і переробл. – К.: Вища шк., 2004 – 655 с.: іл.
19. Спиноу Г. О., Юмашев В. Є. Робототехніка : монографія. Житомир. держ. технол. ун-т. - Житомир, 2008. - 332 с. - Бібліогр.: с. 328-332.

						Арк.
						91
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

20. Мотор QSD165D-50 [електронний ресурс]
<https://www.cnqsmotor.com/product/surron-motor-qs-10-kw-motor-qs165d-50-10000w-mid-drive-motor-for-sur-ron-light-bee/>
21. FOC-контролер NS841000 [електронний ресурс]
<https://www.far-driver.com/ns721000-ns841000-ns961000/>
22. Інвертор WindKraft GC-1.5K [електронний ресурс]
<https://windkraft.com.ua/product/setevoj-grid-tie-invertor-dlja-vetrogeneratora-windkraft/>
23. Компанія ТОВ «ОЛТЕХ» / Круг 360 мм сталь 40Х [електронний ресурс]
<https://olteh.com.ua/p/1347116937-krug-360-mm-stal-20-45-40h/>
24. Каталог SARATOOLS.com [електронний ресурс]
https://sartorius.flipbooks.cloud/catalog/1511EN/ST_Katalog_GB#page_1
25. Ганзюк М.П. Основи охорони праці: Підручник для студентів вищих навчальних закладів / М.П. Ганзюк, Є.П. Желібо, М.О.Халімовський. – видання 2-ге – Київ: Каравела, 2005 – 390 с. – (Вища освіта в Україні).

						Арк.
						92
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		