

ЗАКЛАД ВИЩОЇ ОСВІТИ УКРАЇНИ
«Сумський державний університет»

Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Технологія машинобудування, верстати та інструменти
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи (проєкту)

другий (магістерський)
(освітньо-науковий рівень)

на тему **«Підвищення ефективності використання технологічного обладнання шляхом застосування механічних накопичувачів енергії»**

Виконав: студент II курсу, групи ТМ.м-91
спеціальності: 131 – прикладна
механіка

(шифр і назва спеціальності)

освітньої програми: технології
машинобудування

(назва освітньої програми)

Авраменко С. Є.

(прізвище та ініціали)

Керівники Дегтярьов І. М.

Антош Катожина.

(прізвище та ініціали)

Рецензент _____

(прізвище та ініціали)

**ЗАКЛАД ВИЩОЇ ОСВІТИ УКРАЇНИ
«Сумський державний університет»**

Інститут, факультет	Факультет технічних систем і енергоефективних технологій
Кафедра	Технологія машинобудування, верстати та інструменти
Освітньо-науковий рівень	другий (магістерський) <small>(назва)</small>
Спеціальність	131 – прикладна механіка <small>(шифр і назва)</small>
Освітня програма	технології машинобудування <small>(назва освітньої програми, за наявності)</small>

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри технології
машинобудування, верстатів та
інструментів

_____ Віталій ІВАНОВ

«___» _____ 2020 року

**ЗАВДАННЯ
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ (ПРОЄКТУ) СТУДЕНТУ**

Авраменко Сергій Євгенович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) **«Підвищення ефективності використання технологічного обладнання шляхом застосування механічних накопичувачів енергії»**

керівники проекту **Дегтярьов Іван Михайлович канд. техн. наук, ст. викладач**
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Антош Катажина, д.т.н, доцент

затверджені наказом вищого навчального закладу від « 13 » 11 2020 року за № 1767-III

2. Строк подання студентом роботи (проекту) «20» грудня 2020 року

3. Вихідні дані до роботи (проекту) **Технічні параметри розроблюваного зразка механічного накопичувача енергії.**

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз конструкторсько-технологічні особливості деталей механічних накопичувачів енергії. 2. Розроблення альтернативного підходу до виготовлення та складання деталей механічних накопичувачів енергії та дослідження його ефективності. 3. Розроблення конструкції супермаховика для машинобудівного виробництва. 4. Чисельне моделювання розробленої конструкції супермаховика. 5. Розрахунок економічної ефективності розробленого технічного рішення.

5. Консультанти розділів роботи (проєкту)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях	Фалько В. В., ст. викладач кафедри ЕтаПТ		

6. Дата видачі завдання «10» вересня 2020 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи (проєкту)	Строк виконання етапів роботи (проєкту)	Примітка
1	Актуальність проблеми, визначення мети та завдань досліджень	01.10.2020	Виконано
2	Провести аналіз конструкторсько-технологічні особливості деталей механічних накопичувачів енергії	01.10.2020	Виконано
3	Розроблення альтернативного підходу виготовлення та складання деталей механічних накопичувачів енергії та дослідження його ефективності	01.11.2020	Виконано
4	Розроблення конструкції супермаховика для машинобудівного виробництва	01.12.2020	Виконано
5	Чисельне моделювання розробленої конструкції супермаховика	02.12.2020	Виконано
6	Розрахунок економічної ефективності розробленого технічного рішення.	05.12.2020	Виконано
5	Підготовка розділу з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях	06.12.2020	Виконано
6	Формулювання загальних висновків	10.12.2020	Виконано
7	Підготовка доповіді	14.12.2020	Виконано
8	Підготовка презентації	14.12.2020	Виконано
9	Оформлення роботи	16.02.2020	Виконано

Студент

_____ (підпис)

Сергій АВРАМЕНКО

_____ (ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

Керівники роботи (проєкту)

_____ (підпис)

Іван ДЕГТЯРЬОВ

_____ (ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

Катажина Антош
_____ (підпис)

Катажина АНТОШ,

_____ (ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра становить 77 сторінок, в тому числі 32 рисунки, 5 таблиць, бібліографії із 46 джерел на чотирьох сторінках, трьох додатків на 20 сторінках.

Мета роботи. Дослідження підвищення ефективності використання технологічного обладнання шляхом застосування механічних накопичувачів енергії.

Для досягнення поставленої мети в роботі були встановлені та вирішенні наступні завдання:

1) провести аналіз конструкторсько-технологічних особливостей деталей механічних накопичувачів енергії;

2) розробити альтернативний підхід до виготовлення та складання деталей механічних накопичувачів енергії та дослідження його ефективності;

3) розробити конструкцію супермаховика для машинобудівного виробництва;

4) виконати чисельне моделювання розробленої конструкції супермаховика;

5) провести розрахунок економічної ефективності розробленого технічного рішення.

Об'єкт дослідження – металорізальний верстат.

Предмет дослідження – привід головного руху металорізального верстата.

Наукова новизна отриманих результатів. Наукова новизна результатів роботи полягає у можливості доведення ефективності застосування механічних накопичувачів енергії для підвищення енергоефективності використання металорізальних верстатів.

ВЕРСТАТ, МЕХАНІЧНИЙ НАКОПИЧУВАЧ ЕНЕРГІЇ,
МОДЕЛЮВАННЯ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, СУПЕРМАХОВИК

ABSTRACT

The master's qualification is 77 pages, including 32 drawings, five tables, bibliographies from 46 sources on four pages, three applications on 20 pages.

Research to increase the efficiency of technological equipment through the use of mechanical energy storage.

In order to achieve this goal, the following tasks were established and solved in the work:

- 1) to analyze the design and technological features of the parts of mechanical energy storage devices;
- 2) to develop an alternative approach to the manufacture and assembly of parts of mechanical energy storage and research of its efficiency;
- 3) to develop a superflywheel design for machine-building production;
- 4) perform numerical modeling of the developed superflywheel design;
- 5) to calculate the economic efficiency of the developed technical solution.

The object of study is the metal cutting machine.

The subject of the study is the drive of the main movement of the metal-cutting machine.

Scientific novelty of the results of the work lies in the possibility of proving the efficiency of the use of mechanical energy storage devices to increase the energy efficiency of the use of metal-cutting machines.

MACHINE, MECHANICAL ENERGY STORAGE, MODELING, ENERGY EFFICIENCY, SUPER FLYWHEEL

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Сумський державний університет

Кафедра «Технологія машинобудування, верстати та інструменти»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідуючий кафедрою

_____ Віталій ІВАНОВ

«____» грудня 2020 р.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ МЕХАНІЧНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

Кваліфікаційна робота (проект) магістра

Спеціальність 131 – прикладна механіка

Освітня програма – технології машинобудування

Студент

С. Є. Авраменко

Керівники

І. М. Дегтярьов

К. Антош



Консультант з розділу охорони праці
та безпеки в надзвичайних ситуаціях

В. В. Фалько

Нормоконтроль

О. В. Івченко

Суми – 2020

ЗМІСТ

	с.
Вступ.....	4
Розділ 1 Сучасний стан досліджень у галузі проектування супермаховиків як перспективних накопичувачів енергії.....	7
1.1 Висновок.....	14
Розділ 2 Методика конструювання механічних систем зберігання енергії	15
2.1 Структура та компоненти МСЗЕ	15
2.2 Конструкція компонентів МСЗЕ.....	16
2.3 Висновок.....	29
Розділ 3 Розроблення конструкції супермаховика	30
3.1 Вал.....	30
3.2 Маховик.....	31
3.3 Мотор–генератор.....	33
3.4 Магнітні підшипники.....	35
3.5 Корпус.....	36
3.6 Загальний опис отриманої конструкції.....	37
3.7 Висновок.....	38
Розділ 4 Дослідження запропонованої конструкції.....	39
4.1 Передумови для виконання експериментальних досліджень.....	39
4.2 Чисельне моделювання конструкції супермаховика.....	40
4.3 Динамічне дослідження конструкції супермаховика	44
4.4 Висновок.....	47
Розділ 5 Техніко-економічний аналіз розробленої конструкції супермаховика	48

	3
5.1 Оптимізація споживання енергії шляхом рекуперації	48
5.2 Економічний розрахунок запропонованого методу	49
5.3 Висновок.....	51
Висновки	52
Перелік джерел посилань	53
Додаток А Копії публікації	57
Додаток Б Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях	60
Додаток В Креслення до наукової роботи.....	70

ВСТУП

Актуальність теми. Тема ефективного використання енергоресурсів давно не нова і є всеохоплюючою проблемою для всіх сфер людського життя. Для промисловості ефективність використання матеріальних та енергетичних ресурсів є основною задачею, адже це впливає в першу чергу на собівартість продукції та безпеку навколишнього середовища. Генерація електроенергії з поновлюваних джерел енергії, різко зросла в останні кілька десятиліть, і одна з найважливіших проблем такої енергетики є сталість доступності енергії, тому енергосистеми поновлюваних джерел повинні бути з'єднані з системами зберігання енергії, які зможуть накопичувати її коли існує надлишок і віддавати в період відсутності. Крім того, за рахунок збереження енергії, досягається стійка рівновага між попитом і пропозицією, а відтак віддача електричної потужності може бути стабільною і керуватися більш ефективно. Одним з методів системи зберігання для електричної енергії є перетворення в механічну енергію, яка поділяється в основному на дві частини: кінетичну і потенційну. Саме за законом збереження цих енергій і працюють системи акумуляування.

Розглянемо маховики як перспективну систему накопичення. Маховики існують вже тисячі років. Найдавніше застосування, швидше за все, це гончарне колесо. Найпоширеніше за останній час застосування маховиків - в двигунах внутрішнього згорання. Маховик - це проста форма механічного (кінетичного) зберігання енергії. Енергія накопичується обертанням диска або ротора навколо своєї осі. Збережена енергія пропорційна масі маховика і квадрату його швидкості обертання. Досягнення науки в галузі енергетичної електроніки, створення магнітних підшипників та композитних матеріалів дають основу для створення систем накопичення енергії маховика постійної ємності, які можна використовувати як заміну або доповнення до батарей в системах безперебійного живлення (СБЖ). Хоча виготовлення в цілому дорожче, ніж акумулятори з точки зору першої вартості, але набагато довший

термін експлуатації, простіше обслуговування та екологічність є великими перевагами.

Отже, вимоги до систем зберігання енергії можна підсумувати в необхідності гнучкого і безперервного постачання споживачів енергією без збоїв (таких, як просідання напруги, яке відбувається через перевантаження і може тривати протягом декількох мілісекунд і більше), швидкій реакції на споживану потужність, надійність конструкції та високий запас напрацювання «на відмову». В результаті, система накопичення енергії дозволяє використовувати більшу генеровану потужність від поновлюваних джерел енергії з високою надійністю і гнучкістю.

Таким чином, у зв'язку зі зменшенням кількості та здорожчанням енергоносіїв сьогодні постала нагальна науково-технічна проблема з використання альтернативних джерел енергії у всіх галузях народного господарства та розроблення енергоефективних технічних рішень для підвищення конкурентоспроможності машинобудівних виробництв.

Метою цієї роботи є підвищення ефективності використання металорізального обладнання шляхом застосування механічних накопичувачів енергії.

Для досягнення поставленої мети в роботі були встановлені та вирішені наступні завдання:

- 1) провести аналіз конструкторсько-технологічних особливостей деталей механічних накопичувачів енергії;
- 2) розробити альтернативний підхід до виготовлення та складання деталей механічних накопичувачів енергії та дослідження його ефективності;
- 3) розробити конструкцію супермаховика для машинобудівного виробництва;
- 4) виконати чисельне моделювання розробленої конструкції супермаховика;
- 5) провести розрахунок економічної ефективності розробленого технічного рішення.

Об'єкт дослідження: металорізальний верстат.

Предмет дослідження: привід головного руху металорізального верстата.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у можливості доведення ефективності застосування механічних накопичувачів енергії для підвищення енергоефективності використання металорізальних верстатів;

Практичне значення отриманих результатів економія електричної енергії при роботі верстата шляхом її акумулювання у механічних накопичувачах енергії.

Особистий внесок здобувача.

Положення і результати теоретичних та експериментальних досліджень, що виносяться на захист кваліфікаційної роботи, отримані здобувачем особисто, а саме: виконанні аналітичні розрахунки конструкції механічного накопичувача енергії та виконано чисельне моделювання розробленої конструкції, а також обробку та узагальнення одержаних результатів. На основі критичного аналізу науково-технічної літератури здобувачем систематизовано дані щодо технології виготовлення супермаховиків у різних виробничих умовах. У результаті чисельного моделювання визначено власні моди коливань елементів системи супермаховика та запропоновані оптимальні режими його роботи.

Апробація результатів кваліфікаційної роботи магістра. Основні результати роботи доповідалися на XIX Міжнародній науково-практичній конференції «МАШИНОБУДУВАННЯ ОЧИМА МОЛОДИХ: прогресивні ідеї – наука – виробництво» (м. Суми, 25–26 листопада 2020 року.)

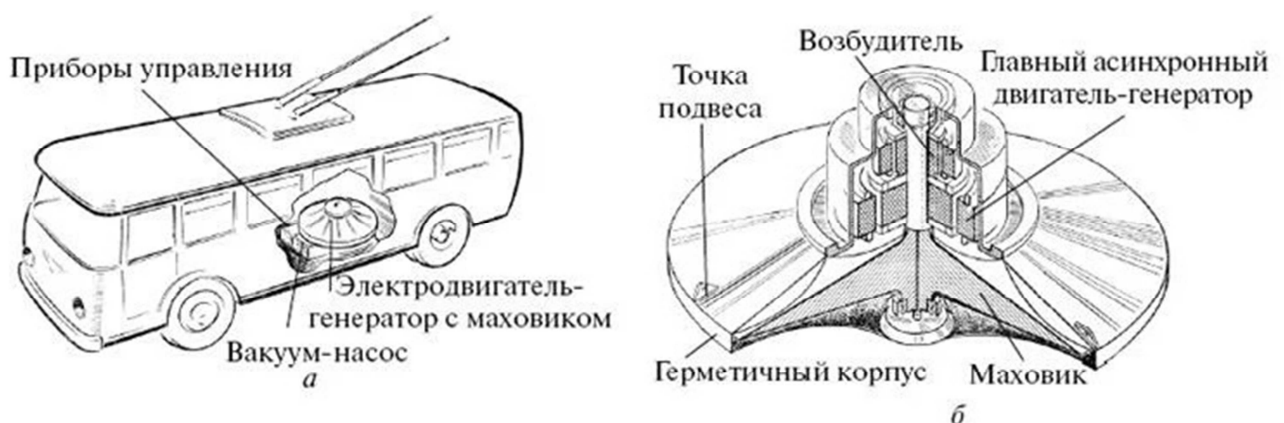
Публікації. Основні результати роботи опубліковано у одній науковій праці – тези доповідей на науковій конференції.

Структура й обсяг кваліфікаційної роботи магістра. Робота складається із вступу, п'яти розділів, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг кваліфікаційної роботи магістра становить 77 сторінок, у тому числі 32 рисунки, 5 таблиць, бібліографії із 46 джерел на чотирьох сторінках, трьох додатків на 20 сторінках.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ У ГАЛУЗІ ПРОЕКТУВАННЯ СУПЕРМАХОВИКІВ ЯК ПЕРСПЕКТИВНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

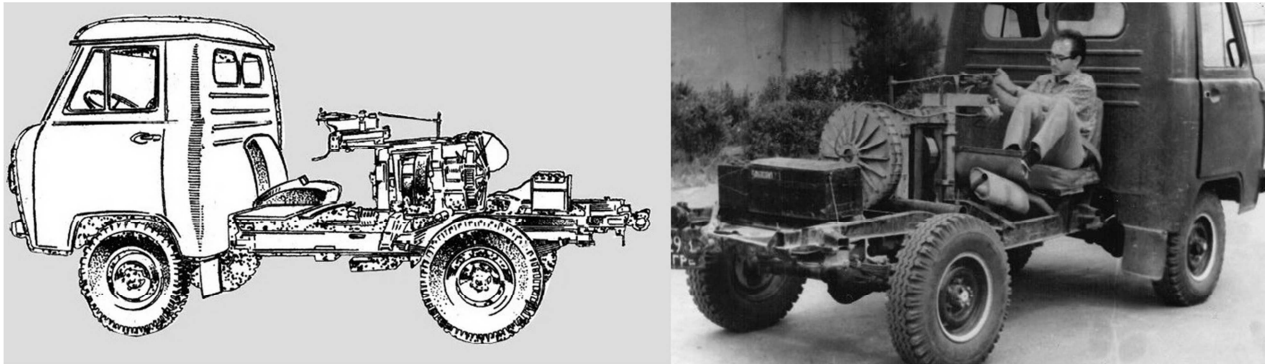
Ідея кінетичних накопичувачів енергії відома ще з давніх часів. Чудовим прикладом такої системи є «гіробус»[1] (рисунок 1.1) – міський автобус, що був розроблений в Maschinenfabrik Oerlikon в Швейцарії в 1930-х роках. Цей транспортний засіб мав лише один супермаховик, який був підключений до електричної машини. На регулярних автобусних зупинках, потужність від електричної зарядної станції використовувалась для прискорення супермаховика. Таким чином, відбувалося перетворення електричної енергії в механічну, запасену маховиком. При пересуванні між автобусними зупинками, електрична машина поступово гальмувала маховик, розряджаючи його. Дискподібний маховик–ротор був зроблений зі сталі, мав масу близько 1,5 метричних тонн і досягав максимальної кутової швидкості 314 рад/с або 3000 об/хв. За нормальних умов, уповільнення маховика обмежувалося приблизно половиною максимальної швидкості диска. Кількість акумульованої енергії дозволяло Girobus долати відстань до 6 км в регулярному трафіку.



Джерело: <https://uk.wikipedia.org/>

Рисунок 1.1 – Гіробус та його маховиковий накопичувач енергії

Пізніше, в 1964 році радянський вчений Нурбей Гуліа заявив авторські права на одну з конструкцій і дав назву – супермаховик (рисунок 1.2). В подальшому було створено декілька експериментальних зразків машин на основі супермаховика та суперваріатора. Всі його розробки і напрацювання описані в його книзі [2] та патенті [3] де було описано вдосконалену конструкцію з системою управління, орієнтовану на безпеку його експлуатації (розрив, займання та ін.) і статті [4] про циклічні випробування супермаховика на міцність і стабільність роботи.



Джерело: <https://alternattiveenergy.com/>

Рисунок 1.2. – Супермаховик Н. Гуліа встановлений на автомобіль УАЗ

Протягом останніх десятиліть було створено безліч конструкцій кінетичних маховиків і супермаховиків. Довгий час маховики намагалися встановити на рухомий транспорт, що працює в режимі розгін–гальмування, але через гіроскопічний ефект та низьку якість матеріалів для маховика та підшипникових опор вони так і не прижилися. В даний час з'явився і зростає ринок стаціонарних накопичувачів енергії, яким не потрібно переміщення в просторі. Можливо, що маховики можуть знайти значне місце на цьому ринку. Існують різні конструкції маховиків. Сучасні конструкції, виконані з композитних матеріалів, володіють енергоємністю $300 \text{ Вт} \cdot \text{год} / \text{кг}$, служать більше 20 років, володіють великим робочим температурним діапазоном [6]. Теоретична гранична енергоємність супермаховика становить $4 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{кг}$.

На сьогоднішній день, електричні мережі мають високий попит на надійні, економічно ефективні, довговічні та екологічно безпечні системи

зберігання енергії для підтримки різноманітних пристроїв для зберігання енергії. З розвитком технологій матеріалів, підшипникових опор та силової електроніки істотно розвинулась технологія маховиків для зберігання енергії [5,6]. Маховики з основними характеристиками високої енергоефективності та високої енергетичної щільності конкурують з іншими технологіями в пристроях для зберігання електричної енергії, а також у транспорті, військовій справі та космічних супутниках низької навколоземної орбіти, далеких польотів тощо [7]. З можливостями зберігання до 500 МДж і потужністю від декількох кВт до ГВт потужності, вони виконують різноманітні важливі програми накопичення енергії в енергосистемах, а саме сонячних та вітроелектростанціях [7,8]. Найбільш розповсюджені маховики як накопичувачі електричної енергії – це системи безперебійного живлення, для миттєвої віддачі потужності в мережу між основним живленням та резервним (СБЖ), чи поліпшення якості електроенергії – вирівнювання частоти та напруги в мережі, залежно від питомого споживання [9,10].

На маховикові системи зберігання енергії (МСЗЕ) було створено кілька літературних праць. Порівняння технологій зберігання енергії проводиться в [11], де числовий та графічний огляд демонструє вдосконалення та проблеми, пов'язані з МСЗЕ. Порівняльний аналіз технологій зберігання енергії для застосувань високої потужності проводиться в [12] та застосування МСЗЕ в якості системи електропостачання наведено в [13]. Управління швидкісним МСЗЕ у космічних супутниках і апаратах обговорюється в [14]. МСЗЕ коротко розглядається в [15], а огляд деяких попередніх проектів представлений у [8]; однак такі джерела пропонують дефіцит інформації. Автори [16] зосередити увагу на розробці двигуна–генератора (ДГ) для МСЗЕ, де загальні електричні машини, що використовуються з маховиками, разом з їх управлінням, повідомляються в [17]. Огляд та моделювання МСЗЕ для ізольованої системи вітроенергетики представлено в [9].

Інтерес до стаціонарних систем в даний час є значним, але ще більша увага зараз приділяється розробці мобільних систем накопичення енергії.

Швидке заряджання і віддача енергії, тобто потужності на одиницю маси робить систему МСЗЕ вельми привабливою для пристроїв, в яких маса блоку накопичення енергії має істотне значення. Застосування в космічній техніці традиційно було на першому місці науково–дослідних і дослідно–конструкторських робіт в цьому контексті.

У транспорті маховики використовуються в гібридних та електричних транспортних засобах для зберігання енергії, коли потрібне різке прискорення, або для надання допомоги у підйомі на гору. У гібридних транспортних засобах постійні потужності забезпечуються двигунами внутрішнього згорання, щоб підтримувати рух автомобіля з постійною оптимальною швидкістю, зменшуючи витрату палива, забруднення повітря і шуму, а також продовжуючи термін експлуатації двигуна за рахунок скорочення вимоги до обслуговування. У той же час, енергія від регенеративного гальмування під час уповільнення руху автомобіля зберігається в маховиках, які будуть подаватися назад, щоб забезпечити прискорення під час прискорення або сходження на пагорби. Єдиними конкурентами маховиків у гібридних транспортних засобах є хімічні акумулятори та ультраконденсатори. Однак ультраконденсатори страждають від низької щільності енергії та більшої вартості. Маховики кращі, ніж батареї, виходячи з їх тривалішого терміну експлуатації, більшої щільності потужності, більшої ефективності та частої можливості зарядки. Крім того, маховики розроблені для застосування в мережах, як для гібридної, так і для електричної систем. Вони також знаходять місце в газотурбінних поїздах з тією ж метою. Бажана швидкість і максимальна вага поїзда визначають енергетичні потреби. За підрахунками, ця система може відновити 30% гальмівної енергії через проблеми сприйнятливості. В електромобілях з хімічними акумуляторами як джерелом приводу маховиків вважається, що вони добре справляються з коливанням енергоспоживання. Це продовжить термін експлуатації акумулятора, оскільки його цикли заряду–розряду стануть більш регулярними. У системах відновлення енергії поїздів маховики встановлюються на станціях або підстанціях, щоб відновлювати енергію за допомогою регенеративного

гальмування і подавати її назад в систему для тягових цілей. Маховики добре підходять для цього застосування через високу швидкість циклів заряду–розряду. Крім того, він дозволяє контролювати зменшення напруги для ліній електропередачі та розподілу, не збільшуючи пропускну спроможність залізниці.

Зовсім недавно, електричні та гібридні транспортні засоби стали ще однією областю застосування. Так звані кінетичні системи рекуперації енергії (KERS) знаходяться в стадії розробки для використання головним чином в автоспорті. Модель блоку KERS показано на рисунку 1.3. У поєднанні з удосконаленою механікою, система цієї передачі маховик здатний досягати максимальної швидкості близько 60000 обертів на хвилину. Накопичення енергії і потужність показаного блоку з масою 25 кг становить 400 кДж і 60 кВт відповідно.

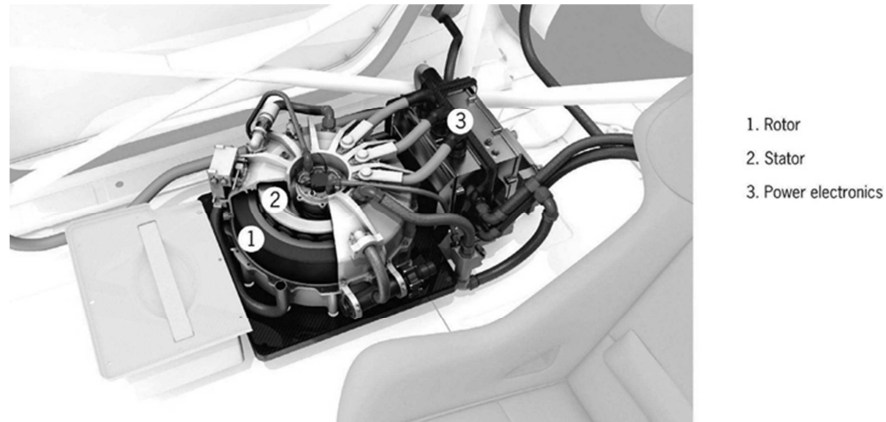


Джерело: <https://alternattiveenergy.com/>

Рисунок 1.3 – Маховик в кінетичній системі відновлення енергії (KERS)

Важливо відзначити, що ця і інші KERS-пристрої не обов'язково передбачають перетворення енергії з електричної в механічну і навпаки; замість цього, механічна енергія передається безпосередньо в маховик з використанням сучасних систем передачі. І навпаки, перетворення електричної

енергії в механічну часто потрібно для гібридних транспортних засобів. Показана на рисунку 1.4 система являє собою електромеханічний блок батарей для високопродуктивного гібридного автомобіля.



Джерело: <https://www.porsche.com/>

Рисунок 1.4 – Система FES в високопродуктивному гібридному автомобілі (F. Porsche AG, Штутгарт, Німеччина)

Маховики знаходять застосування в космічних апаратах, де основним джерелом енергії є сонце, і енергію потрібно зберігати протягом періодів, коли супутник знаходиться в темряві. Маховик для міжнародної космічної станції (МКС) обговорювався в 1961 році і вперше був запропонований у 1970-х. Впродовж останнього десятиліття NASA Glenn Research Center (GRC) був зацікавлений у розробці маховиків для космічних апаратів. Спочатку в конструкціях використовувались акумуляторні батареї, але зараз маховики розглядають у поєднанні з батареями або для їх заміни. Комбінована функціональність батарей та маховиків підвищить ефективність та зменшить масу і вартість космічних апаратів. Запропонована система маховика для NASA має складений ротор і магнітні підшипники, здатні зберігати надлишок 15 МДж і пікову потужність 4,1 кВт, чистий ККД 93,7%. Виходячи з підрахунків NASA, заміна батарей космічної станції маховиками призведе до економії понад 200 мільйонів доларів США [6,7]. Повідомлялося, що система маховиків буде значно меншою і забезпечить кращу вагу, ніж використання акумуляторних пристроїв NiH₂ для використання на космічних апаратах типу EOS-AMI. Було

показано, що маховик пропонує зменшення маси на 35%, зменшення обсягу на 55% та зменшення площі для сонячного масиву на 6,7% [19]. Супермаховик – єдина система зберігання, яка може виконувати подвійні функції, забезпечуючи супутники накопичувачем відновлюваної енергії у поєднанні з контролем живлення [20,21].

У військовій сфері останнім часом спостерігається тенденція до включення електроенергії у військові наземні транспортні засоби, а також для зброї, навігації, зв'язку та пов'язаних з ними інтелектуальних систем. Це використання електричної енергії з різною швидкістю та різним рівнем потужності вимагає накопичення енергії, щоб швидко та надійно реагувати на цю змінну потребу в енергії. Гібридна електрична енергія є важливою для майбутніх бойових машин тому маховики представляються відповідною технологією зберігання енергії для цих застосувань. Вони поєднуються з суперконденсаторами для забезпечення потужності для високошвидкісних систем, що є чутливими до збоїв живлення менше 10 мкс.

Маховики, ймовірно, знайдуть застосування і при запуску літаків з перевізників. Наразі ці системи приводяться в дію від акумуляторів пари для зберігання енергії; однак маховики можуть замінити ці акумулятори, щоб зменшити розмір енергогенеруючих систем. Супермаховики інтегруються в мікромережу, яка обслуговує морську піхоту США в Каліфорнії, щоб забезпечити пристрої для зберігання енергії протягом усього розподіленого покоління на базі [22]. Мета проекту – забезпечити енергетичну безпеку військових об'єктів, що використовують відновлювані джерела енергії. Це мережа взаємопов'язаних менших мікромереж, які вкладені у велику масштабну мережу потужністю 1,1 МВт, що включає сонячні фотоелектричні системи, дизельні генератори, батареї та маховики потужністю 60 кВт, 120 кВт/год [23]. Акумулятована енергія маховика призначена для зменшення залежності від дизельних генераторів приблизно на 40% та забезпечення енергією під час пікових навантажень високої потужності. Слід зазначити, що

супермаховики продовжують термін експлуатації акумуляторів, а самі працюють до 20–25 років [23].

1.1 Висновок

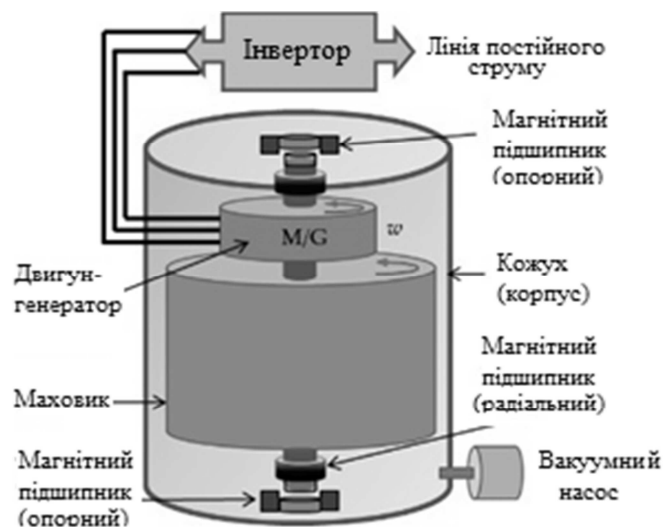
Аналіз джерел літератури показав, що в даний час ідея створення акумуляторів енергії та систем рекуперації на основі механічних накопичувачів розвивається все більше і більше та є досить перспективним напрямком в енергетичних технологіях. Відбувається це через розвиток технологій проектування і виготовлення та значним стрибком виробництва конструкційних матеріалів з високими показниками міцності. Слід зазначити також, що науковці займаються розробкою і розрахунками моделей механічних накопичувачів для застосування у найрізноманітніших сферах їх можливого застосування, що дає велике підґрунтя для подальших розробок та вдосконалення конструкції.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА КОНСТРУЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГІЇ

2.1 Структура та компоненти МСЗЕ

Супермаховик як систему зберігання енергії, можна поділити на дві основні категорії; перша – система маховика низьких швидкостей обертання (менш ніж 10000 обертів на хвилину), яка складається з сталевого ротора і механічного підшипника. Друга система є системою маховика з високою швидкістю (до 60000 оборотів в хвилину), і ротор виготовлений з композиційного матеріалу та використовує магнітні підшипники замість механічних, але в цілому, основні частини системи зберігання є наступними і показані на рисунку 2.1.



Джерело: <https://www.energovector.com/>

Рисунок 2.1 – Будова та компоненти маховика

- Електричний двигун–генератор, який працює в якості двигуна при заряджанні і як генератор при розряджанні;
- Маховик ротор, який зберігає кінетичну енергію;
- Підшипник, (найчастіше магнітний) щоб зменшити втрати на тертя;

- Двонаправлений конвертер, що забезпечує передачу електричної потужності в обох напрямках під час зарядки і розрядки;
- Вакуумний насос (для створення розрідження в камері обертання).

2.2 Конструкція компонентів МСЗЕ

Ротор–маховик

Кількість збереженої енергії в маховику пов'язана з формою маси і матеріалу, моменту інерції і швидкості, як показано в рівнянні (1)

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2, \quad (1)$$

де E – кількість запасеної кінетичної енергії,
 I – момент інерції,
 ω – швидкість обертання.

Момент інерції I залежить від форми маховика, для суцільного диска момент інерції задається рівнянням (2):

$$I = \frac{1}{2} m r^2, \quad (2)$$

де I – це момент інерції,
 m – маса твердого диска,
 r – радіус диска.

Для маховика диска з отвором, момент інерції задається наступним рівнянням (3):

$$I = \frac{1}{2} m (r_2^2 - r_1^2), \quad (3)$$

де r_2 являє собою зовнішній радіус і r_1 внутрішній радіус, як показано на рисунку 2.2.

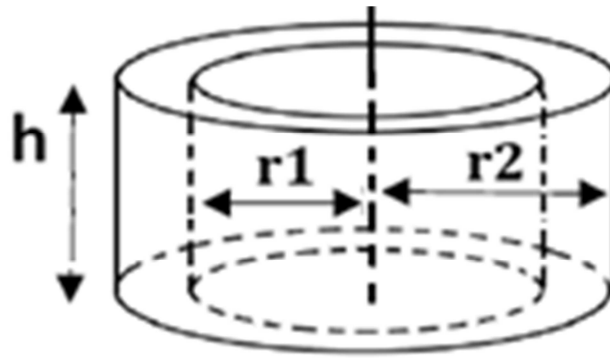


Рисунок 2.2 – Диск з отвором

Маса диска з отвором висотою h і щільністю ρ задається рівнянням:

$$m = \rho \pi h (r_2^2 - r_1^2) \quad (4)$$

З рівнянь (1), (3) і (4), кінетична енергія диска маховика задається рівнянням 5:

$$E = \frac{1}{4} \rho \pi h \omega^2 (r_2^4 - r_1^4) \quad (5)$$

Для того, щоб гарантувати, що швидкість маховика не занадто низька або занадто висока, вона повинна бути обмежена між ω_{\min} і ω_{\max} , це також гарантує, що маховик забезпечує прийнятний рівень напруги з низьким рівнем флуктуації, так що в цьому випадку кінетична енергія виражається рівнянням:

$$E = \frac{1}{2} I (\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2) \quad (6)$$

Форма і матеріал маховика

Також необхідно враховувати при проектуванні маховика межу міцності матеріалу. Коли швидкість збільшується, напруження на розрив також збільшується і не повинно перевищувати межу міцності на розрив матеріалу.

$$\sigma_{\max} = \rho r^2 \omega^2 \quad (\text{Н / м}^2), \quad (7)$$

де σ_{max} це максимальна міцність на розрив;

ρ – щільність матеріалу;

r – радіус;

ω – швидкість.









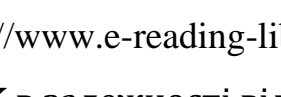
Таким чином, максимальна кінетична енергія на одиницю об'єму (щільність) енергії і в розрахунку на одиницю маси (питому енергію) задаються рівняннями (8) і (9).

$$E_{v,max} = K\sigma_{max} \quad (\text{Дж} / \text{м}^3) \quad (8)$$

$$E_{v_{max}} = K \frac{\sigma_{max}}{\rho} \quad (\text{Дж} / \text{кг}) \quad (9)$$

де K – коефіцієнт форми маховика, який пов'язаний з геометрією конструкції маховика, як показано на рисунку 2.3.

Можна збільшити кількість запасеної кінетичної енергії в маховику за рахунок збільшення швидкості обертання або шляхом збільшення моменту інерції. Кращий варіант для матеріалу маховика повинен мати низьку щільність і високу міцність на розтягнення, і коефіцієнт форми ротора має бути близько чи дорівнювати 1.

<i>Flywheel Geometry</i>	<i>Cross-Section or Pictorial View</i>	<i>Shape Factor K</i>	
<i>Constant-Stress Disc (OD $\rightarrow \infty$)</i>		1.000	} <i>Suitable for Homogeneous Materials Only</i>
<i>Modified Constant-Stress Disc (Typical)</i>		.931	
<i>Truncated Conical Disc (Typical)</i>		.806	
<i>Flat Unpierced Disc</i>		.606	
<i>Thin Rim (ID/OD $\rightarrow 1.0$)</i>		.500	} <i>Suitable for Homogeneous or Filamentary Materials</i>
<i>Shaped Bar (OD $\rightarrow \infty$)</i>		.500	
<i>Rim with Web (Typical)</i>		.400	
<i>Single Filament Bar</i>		.333	
<i>Flat Pierced Disc</i>		.305	

Джерело: <https://www.e-reading-lib.com/>

Рисунок 2.3 – Коефіцієнт K в залежності від форми маховика

Таблиця 2.1 представляє властивості різних матеріалів тонкого обода маховика ротора де $K = 0,5$ і 1 кг маси. Оптимальний матеріал для маховика ротора композитних матеріалів, які мають низьку щільність і високу міцність на розрив і дозволяють високі швидкості обертання.

Таблиця 2.1– Властивості різних матеріалів для тонкого обода маховика

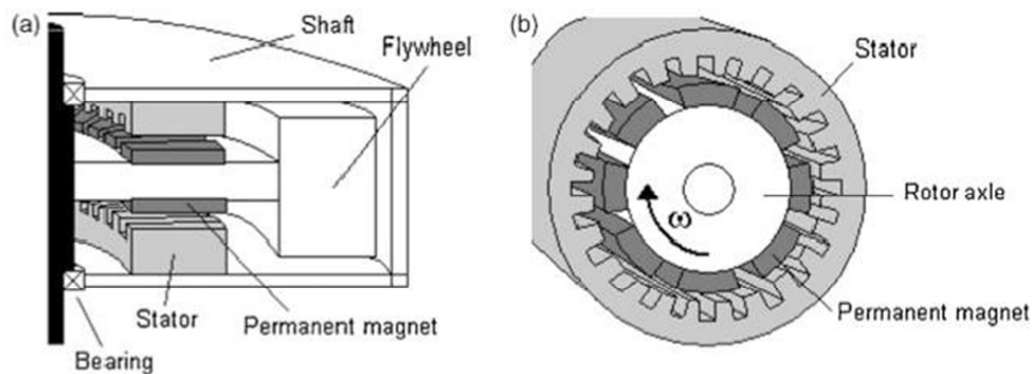
Матеріал обода маховика	Щільність ρ (г/см ³)	Межа міцності на розрив σ_{max} (МПа)	Максимальна питома кінетична енергія на кілограм маси (Вт / кг)	Максимальна лінійна швидкість або критична швидкість (м / с)
Металеві тонкі кільця				
Алюміній 7075 T651 ²	2,8 0	4 69	23, 3	40 9
Титан Ti-6Al-4V, STA ³	4,4 3	9 65	30, 3	46 7
Сталь 4340, QT ⁴	7,7 0	1 500	27, 1	44 1
Композитні тонкі кільця (всі об'ємні волокна фракції 65% і $\rho = 1,28$ г / см ³)				
E-скла / епоксидної смоли	2,1 5	1 679	10 8	+8 84
S-скло / епоксидні смоли	2,0 7	2 235	15 0	+1 038
AC4 вуглець / епоксидні смоли	1,6 1	2 111	18 2	+1 145
IM7 карбон / епоксидної смоли	1,6 1	2 589	22 4	12 70
IM9 карбон / епоксидні смоли	1,6 2	2 993	25 7	13 60

Маховики з низькою швидкістю виготовляються, як правило, з більш важкого металевого матеріалу і підтримуються механічними або магнітними підшипниками. Високошвидкісні маховики зазвичай використовують більш легкі, але міцні композитні матеріали і потребують магнітних підшипників. Ціна швидкісних маховиків може бути в п'ять разів вище, ніж вартість маховиків низької швидкості відповідно. Вартість маховика регулюється конструкцією всієї системи, а не ротора, хоча цей основний елемент може диктувати конструкцію інших елементів системи, а отже, загальну вартість. Розробляється також новий клас маховиків середньої швидкості, що вище від вартості сталевих матеріалів, але досить високої щільності енергії, заснованої на використанні ламінованої сталі.

Електрична машина

Перетворення електричної енергії в механічну і навпаки відбувається в двигун-генераторі, двигун перетворює надлишкову електричну енергію в механічну енергію за рахунок прискорення маховика, який інтегрований в ротора двигуна під час періоду зарядки, і протягом періоду розрядки маховик викликає інвертування процесу, він вивільняє накопичену кінетичну енергію і вмикає машину для роботи в якості генератора. Основні критерії вибору оптимального двигуна для маховикової системи зберігання: без щіткове виконання, можливість працювати на високій швидкості і мати низькі електричні втрати, високу щільність потужності, високу ефективність і низькі втрати на роторі. Крім того, генератор повинен мати можливість виробляти високий рівень напруги з низьким струмом, щоб забезпечити високу потужність з низькими втратами на нагріванні провідників.

Є багато варіантів, щоб вибрати тип двигуна, але основний варіант для системи зберігання енергії маховика використовувати мотор на постійних магнітах, яка має високу щільність потужності, високу ефективність і великий крутний момент ротора. Існують два основних типи машин з постійними магнітами: розміщенням магнітів по осі чи в радіальному напрямку (AFPM і RFPM), як показано на рисунку 2.4. Постійні магніти AFPM інтегровані в маховику ротор і статор закріплений в корпус.



Джерело: <https://www.e-reading-lib.com/>

Рисунок 2.4 – (а): AFPM двигун і (б): структура машини RFPM

AFPM двигуна також можуть бути розроблені в різних типів, таких як внутрішній ротор, зовнішній ротор, два статора об'єднані в один ротор, як показано на рисунку 2.4 (а), і два ротори об'єднати в одному статорі. Інші типи електромоторів використовуються в таких системах, такі як асинхронні і синхронні двигуни змінного струму а також вентильні реактивні двигуни. Їх характеристики наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2: Порівняння між трьома типами двигунів

Двигун	Асинхронний	Вентильний реактивний	Синхронний (постійні магніти)
Потужність	Висока	Середня та низька	Середня та низька
Питома потужність	Середній ($\approx 0,7$ кВт/ кг)	Середній ($\approx 0,7$ кВт / кг)	Висока ($\approx 1,2$ кВт/кг)
Роторні втрати	Мідь і залізо	Залізо (через шари)	Немає
Втрати на обертанні	Сумарні від потоку анулювання	Сумарні від потоку анулювання	Незнімна, Статичний потік
ККД	Висока (93,4%)	Висока (93%)	Дуже висока (95,2%)
Керування	Векторне	Синхронне: векторне управління	Синусоїдально-векторне управління.
Розмір	1,8 кг / кВт	2,6 кг / кВт	2,3 кг / кВт
Межа міцності на розрив	Середня	Середня	Низька
Пульсація крут. моменту	Середня (7,3%)	Висока (24%)	Середня(10%)
Максимальна / базова швидкість	Середня (> 3)	Висока (> 4)	Низька (< 2)
Розмагнічування	Ні	Ні	Так
Вартість	Низька (22 € /кВт)	Низька (24 € /кВт)	Висока(3824 € / кВт)

Силова електроніка

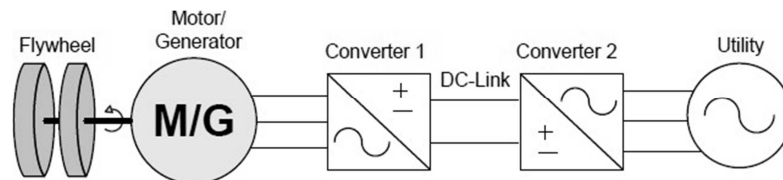
Перетворення енергії в механічних системах зберігання енергії (МСЗЕ) здійснюється за допомогою електричної машини та двонаправленого перетворювача потужності. Топології електронного перетворювача потужності, які можна використовувати для програм МСЗЕ, – це DC–AC, AC–AC і AC–DC–AC або їх комбінація. Комутаційні пристрої перетворювачів живлення вибираються виходячи з їх експлуатаційних характеристик та застосування. До них відносяться біполярний перехідний транзистор (BJT), напівпровідниковий польовий транзистор з оксидом металу (MOSFET), біполярний транзистор з ізолюваним затвором (IGBT) та тиристор (SCR, GTO, MCT). Найчастіше використовувані вимикачі – це кремнієвий випрямляч (SCR), тиристор вимикання затвора (GTO) та IGBT. SCR і GTO традиційно використовуються для перетворювачів живлення змінної частоти. Однак в останні роки було прийнято застосовувати IGBT завдяки високій потужності та більшій частоті комутації.

Широко використовується конфігурація перетворювачів живлення в МСЗЕ – це конфігурація "назад до спини" (ВТВ) або змінного струму, підключеного до конденсатора ланцюга постійного струму. Перетворювачі в топології ВТВ – це трифазні мостові напівпровідникові вимикачі, які часто керуються методом широтно–імпульсної модуляції (ШІМ). ШІМ використовує прямокутні імпульси і модулює ширину цих імпульсів для отримання змінної форми хвилі. Імпульси застосовуються до перетворювача силової електроніки для отримання синусоїдального змінного струму з входу постійного струму. Мережевий перетворювач підтримує постійну напругу зв'язку, де для управління роботою МГ та маховика використовується машинний бічний перетворювач.

Перетворювач постійного струму в змінний струм, зазвичай відомий як інвертор, виробляє на виході змінний струм потрібної величини та частоти з фіксованого або змінного входу постійного струму. Змінні форми вихідної хвилі досягаються шляхом зміни входу постійного струму або регулювання

коефіцієнта посилення інвертора. У програмах вітроенергетики використовується інвертор для підключення МСЗЕ безпосередньо до електромережі або до ланцюга постійного струму вітрогенератора. У пристроях з високою потужністю та високою напругою, дворівневі перетворювачі постійного струму змінного струму обмежуються роботою на високій частоті через втрати комутації та обмеження номінальної потужності пристрою. Багаторівневі інвертори, що мають додатковий конденсатор постійного струму, можуть використовуватися для отримання більш високих напруг із меншим перехідним періодом. Поширені багаторівневі топології перетворювачів у промисловості – це діодні затискачі або перетворювачі з нейтральною точкою (NPC), каскадні H-мостові перетворювачі та суперконденсатори.

Принцип роботи двонаправленого перетворювача заснована на AC–DC–AC топології, він перетворює напругу змінного струму в постійний струм, а потім від постійної напруги в змінну, це дає можливість контролювати частоту і напругу, тому двонаправлений перетворювач може бути розділений на три частини: перетворювач зі сторони двигуна, ланцюг постійного струму і бічний мережевий перетворювач, як показано на рисунку 2.5.



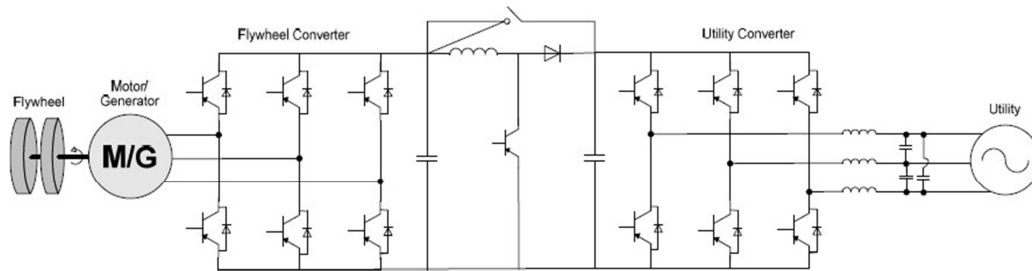
Джерело: <https://www.e-reading-lib.com/>

Рисунок 2.5 – Схема ввімкнення супермаховика в мережу

Ланка постійного струму також дає можливість підключення декількох систем маховиків паралельно для високого попиту накопичення енергії.

Робота перетворювача містить три режими: режим зарядки, стабільного режиму і режим вивантаження. У режимі зарядки, мережевий перетворювач працює як випрямляч, в той час як перетворювач з боку двигуна працює як інвертор – прискорює маховик. Коли маховик досягає необхідну швидкість

перетворювач встановлюється в режим очікування. Розвантажувальний режим призводить до протилежної операції, перетворювач з боку двигуна працює як випрямляч, а мережевий перетворювач працює як інвертор, щоб надати необхідну енергію до мережі, це вповільнює маховик, а отже напруга зменшується. Для запобігання коливання напруги додають підвищуючий перетворювач в ланцюг постійного струму, щоб забезпечити стабільний рівень напруги постійного струму, як показано на рисунку 2.6.



Джерело: <https://www.e-reading-lib.com/>

Рисунок 2.6 – Схема підключення з перетворювачем в ланцюзі постійного струму

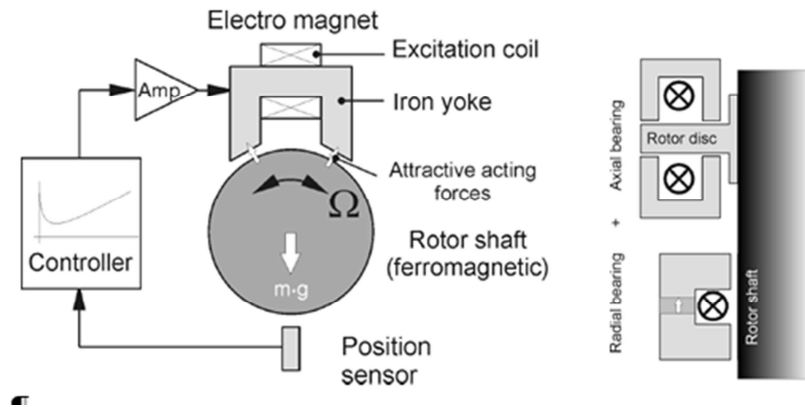
Підшипники

Підшипники необхідні для утримання ротора і маховика на місці з дуже низьким тертям, але при цьому є опорним механізмом маховика. Підшипникова система може бути механічною або магнітною, залежно від ваги, терміну експлуатації та менших втрат. Газові підшипники не можна використовувати через вакуум всередині корпусу. Традиційно застосовуються механічні кулькові підшипники, але вони мають більш високе тертя порівняно з магнітними підшипниками, а також потребують більш високого обслуговування внаслідок зносу мастила. Ці труднощі можна усунути, використовуючи гібридну систему магнітних та механічних підшипників. Магнітний підшипник не має втрат на тертя і не потребує змащування, але, якщо він активний, потрібна потужність для його живлення. Він стабілізує маховик, підтримуючи свою вагу за допомогою постійних магнітів. Постійні (пасивні) магнітні підшипники (ПМП), активні магнітні підшипники (АМП) і

надпровідні магнітні підшипники (НМП) є основними типами магнітних підшипникових систем. ПМП має високу жорсткість, низьку вартість і низькі втрати через відсутність струму. Однак він має обмеження в забезпеченні стійкості і зазвичай розглядається як допоміжна підшипникова система. АМП управляється магнітним полем, яке виробляється від струмоведучих котушок, що контролюють положення ротора. Він позиціонує ротор через систему зворотного зв'язку, застосовуючи змінні сили, які визначаються виходячи з відхилення положення ротора, завдяки зовнішнім зусиллям. АМП має високу вартість, складну систему управління і споживає енергію для роботи, що, в свою чергу, збільшує втрати системи. На втрату очікування МСЗЕ впливає маса АМП. Як результат, збільшення швидкості обертання та маса АМП додають до втрат на стержнях та обмотках АМП. Для забезпечення ефективної роботи всієї системи необхідно досягти компромісу між швидкістю та втратами. НМП забезпечує високу швидкість, без тертя, тривалий термін експлуатації, компактну та стабільну роботу. Це найкращий магнітний підшипник для роботи з високою швидкістю, оскільки він може стабілізувати маховик без електрики або системи позиціонування. Однак для НМП необхідна криогенна система охолодження, оскільки вона працює при дуже низькій температурі; але останнім часом це було вдосконалено за допомогою високотемпературних надпровідників. Основним недоліком системи НМП є її дуже висока вартість. Паразитні втрати механічних підшипників становлять близько 5% загальної ємності зберігання за годину, якщо не використовуються гібридні системи. Цей коефіцієнт становить приблизно 1% для електромагнітних підшипників і може бути додатково знижений до 0,1% за допомогою підшипників АМП. Використання гібридних підшипників зменшить втрати та складність системи управління, а також забезпечить стабільне та економічно ефективне рішення. Компактна система зберігання енергії маховика, яка підтримується гібридними механіко–магнітними підшипниками, запропонована в [18]. Магнітна левітація у вертикальній орієнтації підтримується магнітним підшипником, тоді як поступальна і обертальна левітація створюється механічним підшипником.

Однак, можливість ПМП утримувати систему під час високих швидкостей все ще залишається під питанням.

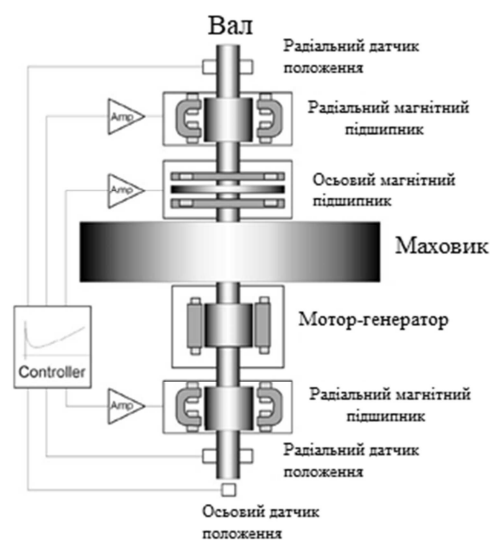
Принцип роботи активного магнітного підшипника засновано на електромагнітних силах для підтримки положення ротора, тому вона вимагає контролера та датчика положення, як показано на рисунку 2.7.



Джерело: <https://www.e-reading-lib.com/>

Рисунок 2.7 – Структура активного магнітного підшипника та положення осевого і радіального підшипників

Відповідно до напрямку навантаження, магнітні підшипники можуть бути осевими чи радіальними. Для підтримки стабільної левітації потрібно два радіальних підшипників і один осевий, як показано на рисунку 2.8.



Джерело: <https://www.e-reading-lib.com/>

Рисунок 2.8 – Маховик з несучою системою

Корпус

Корпус має дві цілі: створити середовище для створення вакууму та для утримування ротора в разі виходу з ладу. Аеродинамічні втрати на вагу у МСЗЕ збільшуються із кубом швидкості обертання, якщо система працює в атмосферному тиску. Ці втрати зменшуються за рахунок встановлення маховика у вакуумному корпусі для підвищення продуктивності та безпеки системи. Кожух або корпус є нерухомою частиною маховика і зазвичай виготовляється з товстої сталі або іншого матеріалу високої міцності, наприклад композитів. Корпус утримує ротор у вакуумі для контролю аеродинамічних втрат ротора, підтримуючи низький тиск усередині пристрою, таким чином, витримуючи розриви внаслідок можливих збоїв ротора. Для роботи системи при такому низькому тиску потрібен вакуумний насос та ефективна система охолодження для відводу тепла, що утворюється від підшипників, мотор–генератора та деяких інших частин МСЗЕ. Коли вмикання маховика і вимикання відбувається через мотор–генератор, обертових ущільнювачів немає, тому витік буде дуже малим. Це означає, що вакуумному насосу не потрібно часто працювати, або його можна усунути при достатній герметизації корпусу. Робота вакуумного насоса залежить від типу ротора. Композитні ротори мають дуже високу окружну швидкість, що вимагає нижчого (жорсткішого) вакуумного тиску та виходу, що обумовлено характером матричних матеріалів з полімерної смоли на відміну від сталі. Альтернативний підхід полягає у використанні газової суміші гелію та повітря, що зменшує як аеродинамічні втрати від опору, так і вимоги до охолодження системи.

У разі відмови, складені ротори мають тенденцію до розриву на численні дрібні фрагменти, і його енергія розсіюється тертям, коли фрагменти обертаються всередині кожуха. У цьому випадку тиск накопичується всередині кожуха та торцевих пластин кожуха. Якщо повітря потрапить під час відмови, то може відбутись значно сильніший вибух пилу, що призведе до необхідності більш сильного утримання. Сталеві ротори з однієї деталі можуть розриватися

на кілька фрагментів, що важко витримує корпус, тому потрібні дуже великі системи утримання. Цю проблему можна усунути, зробивши ротор із стопки тонших дисків, як пояснено у розділі про ротори. Це тому, що катастрофічна несправність випустить частину енергії, що міститься в маховику ротора. Конструкція корпусу для швидкісного МСЗЕ буде дорівнювати половині ваги маховика, тоді як цей коефіцієнт був би в два з половиною рази більшим для низько швидкісної МСЗЕ, згідно [15]. Автори дотримуються іншого погляду на цей множник, як це робить більшість виробників маховиків, які застосовують цілий ряд позицій для забезпечення, включаючи розміщення маховиків у товстостінних багат шарових корпусах.

2.3 Висновок

Наведена методика проектування базується на розглянутих у першому розділі джерелах літератури та дає повне уявлення про послідовність конструювання супермаховиків, підбір всіх його компонентів, їх характеристик та загальні конструкційні особливості. Наведено детальний аналіз ефективності тих чи інших компонентів даного виробу та надані рекомендації щодо їх використання залежно від поставленого технічного завдання.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ СУПЕРМАХОВИКА

Виходячи з всіх вищерозглянутих джерел та рекомендацій, розробимо конструкцію супермаховика, яка відповідала б таким вимогам: простота конструкції, дешевизна виготовлення та експлуатації, довговічність, ремонтпридатність, уніфікованість вузлів з іншими, вже існуючими, моделями, безпечність експлуатації та легкість інтеграції в електросистему верстата чи цеху в цілому.

Як основу, візьмемо конструкцію що представлена на рисунку 2.8, але адаптуємо під наше технічне завдання.

3.1 Вал

Вал супермаховика є основним несучим компонентом всієї системи. На ньому повинні розміщуватися всі основні елементи: маховик, внутрішні кільця магнітних підшипників, ротор мотор-генератора.

Виходячи з вищеперерахованого, можна скласти вимоги для деталі вал. В першу чергу повинен витримувати високі частоти обертання та мати високу міцність на кручення та розтягнення, бути легким за масою та добре оброблюватись звичними методами лезової та абразивної обробки, а також мати низьку ціну.

Згідно з описом, найкращим матеріалом для виготовлення буде титановий сплав Titanium Beta C, або ж $Ti3Al8V6Cr4Mo4Zr$. Його фізичні властивості показані в таблиці 3.1.

Запропонована Конструкція являє собою ступінчастий вал з циліндричними шийками. Ескіз та діаметрію деталі вал представлено на рисунку 3.1.

Таблиця 3.1 – Фізичні властивості Ti3Al8V6Cr4Zr4Mo

Властивості	Одиниці виміру
Щільність	4,82 г / см ³
Точка плавлення	1555 – 1650 ° С
Міцність на розрив	825 МПа
Подовження при розриві	7,0%
Модуль пружності	88,0 ГПа
Міцність на розрив, гранична	860 МПа
Коефіцієнт Пуассона	0,33
Модуль зсуву	40,0 ГПа
Міцність на зсув	620 МПа

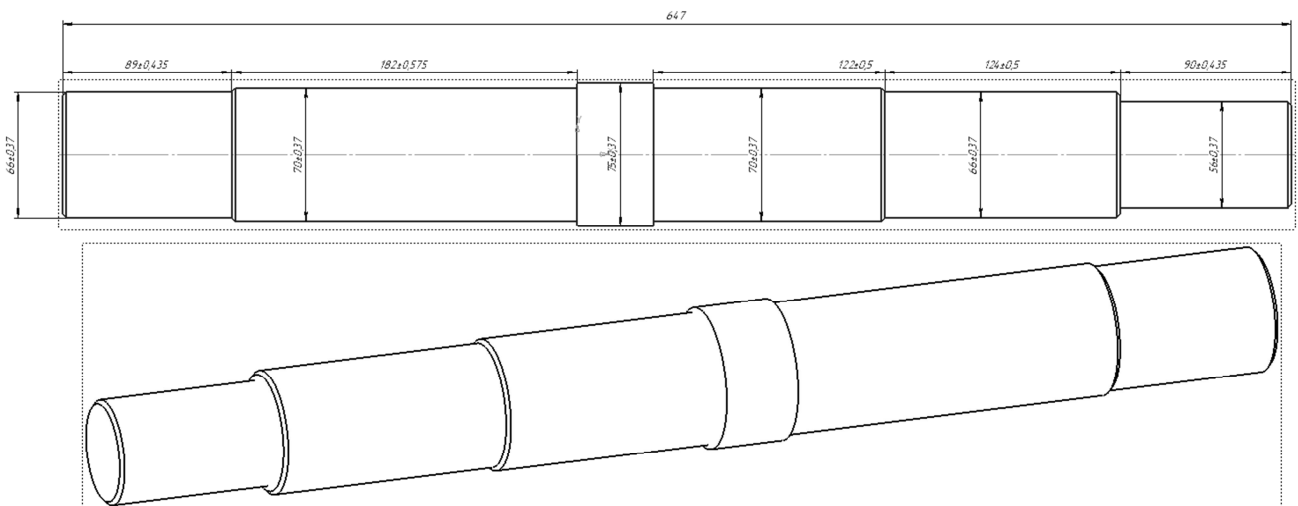


Рисунок 3.1 – Ескіз деталі вал

3.2 Маховик

Маховикове колесо є основним елементом проєктованого механізму. Саме воно буде накопичувати і віддавати енергію, виконуючи роль акумулятора.

Розробимо його конструкцію, виходячи з рекомендацій розділу два. Оберемо форму рівномірно навантаженого диску, а в якості матеріалу використаємо карбонове волокно HexTow ® AS4. HexTow ® Вуглецеве

волокно AS4 – це безперервне, високоміцне, високонапружене волокно на основі PAN, доступне у кількості 3000 (3K), 6000 (6K) і 12000 (12K) ниток. Це волокно було поверхнево оброблено і може бути розміром для поліпшення його міжшарових зсувних властивостей, характеристик обробки та структурних властивостей, і воно пропонується для використання в ткацтві, попередньому намотуванні, намотуванні ниток, обплетенні та пултрузії.

Технічні характеристики даного матеріалу представлені нижче, на рисунку 3.2.

Типові властивості волокна	Одиниці США	Одиниці СІ
Міцність на розрив		
3K	685 ксі	4723 МПа
6K	650 ксі	4482 МПа
12 тис	645 ксі	4447 МПа
Модуль розтягування (хорда 6000-1000) Кінцеве		
	33,5 мсі	231 ГПа
подовження при руйнуванні		
3K	1,8%	1,8%
6K	1,7%	1,7%
12 тис	1,7%	1,7%
Щільність		
	0,0647 фунт / дюйм ³	1,79 г / см ³
Вага / довжина		
3K	11,8 x 10 ⁻⁴ фунт / дюйм	0,210 г / м
6K	23,9 x 10 ⁻⁴ фунт / дюйм	0,427 г / м
12 тис	48,0 x 10 ⁻⁴ фунт / дюйм	0,858 г / м
Приблизна довжина нитки на одиницю маси		
3K	7086 футів / фунт	4,75 м / г.
6K	3485 футів / фунт	2,34 м / г
12 тис	1734 футів / фунт	1,17 м / г.
Площа поперечного перерізу буксиру		
3K	1,82 x 10 ⁻⁴ в ²	0,12 мм ²
6K	3,70 x 10 ⁻⁴ в ²	0,24 мм ²
12 тис	7,43 x 10 ⁻⁴ в ²	0,48 мм ²
Діаметр нитки		
	0,280 млн	7,1 мкм
Вміст вуглецю		
	94,0%	94,0%
Можливість скручування		
	Ніколи не кручений	Ніколи не кручений

Джерело: <https://www.hexcel.com/>

Рисунок 3.2 – Характеристики карбонового волокна

HexTow® AS4

Оскільки даний матеріал є досить дорогим, зменшення його кількості для виготовлення маховика буде економічно вигідним, тому доцільно застосувати більш дешевий матеріал в тих місцях, що не піддаються навантаженням.

Таким рішенням виступає втулка, на яку буде намотаний волоконний маховик. До того ж дане рішення сприяє збільшенню площі контакту волокна з несучим валом, порівняно зі звичайною циліндричною намоткою. В якості

матеріалу для неї виступає титановий сплав Titanium Beta C, або ж Ti–3Al–8V–6Cr–4Mo–4Zr, з якого виготовлений вал.

Ескіз втулки і волоконного маховика зображено на рисунку 3.3.

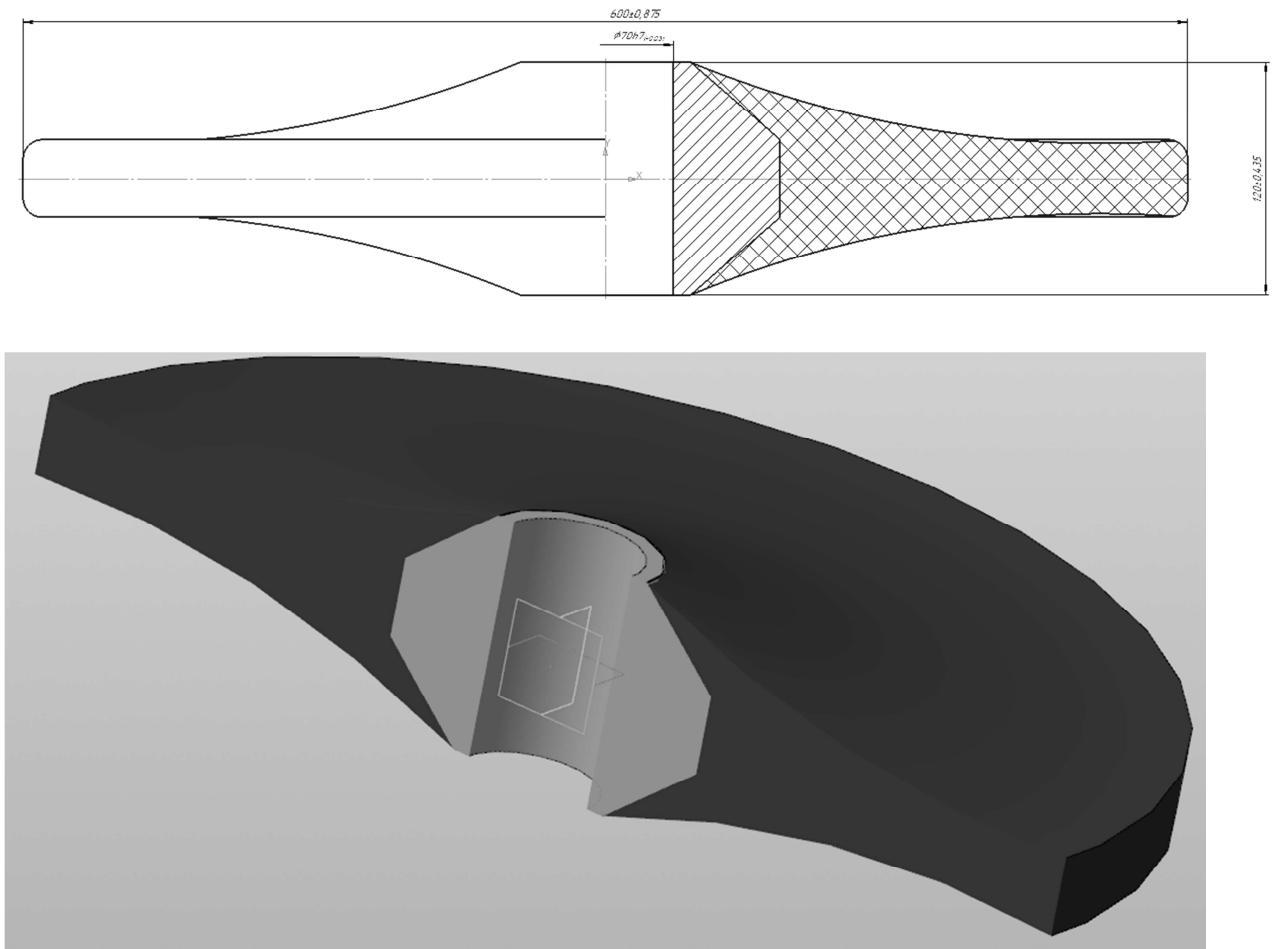


Рисунок 3.3 – Ескіз маховика з втулкою

3.3 Мотор–генератор

Електрична машина типу мотор–генератор буде виконувати функцію заряду–розряду енергії, накопиченої в маховику. Найкраще для цього підійдуть безколекторні електродвигуни на постійних магнітах, адже вони можуть виконувати функцію як двигуна так і генератора, можуть керуватися ШІМ–сигналом, мають найбільшу питому потужність на одиницю маси, невибагливі в ремонті та експлуатації та дуже поширені в сучасних електромобілях. Обираємо компонування такого двигуна, в якому постійні магніти розташовуються на роторі, а котушки індуктивності закріплені нерухомо.

Типовий такий двигун представлений на рисунку 3.4, а його адаптований для наших потреб прототип на рисунку 3.5. Слід зазначити, що цей елемент зображено в загальному вигляді для спрощення проектування.



Джерело: <https://www.insidecarelectronics.com/>

Рисунок 3.4 – Двигун на постійних магнітах

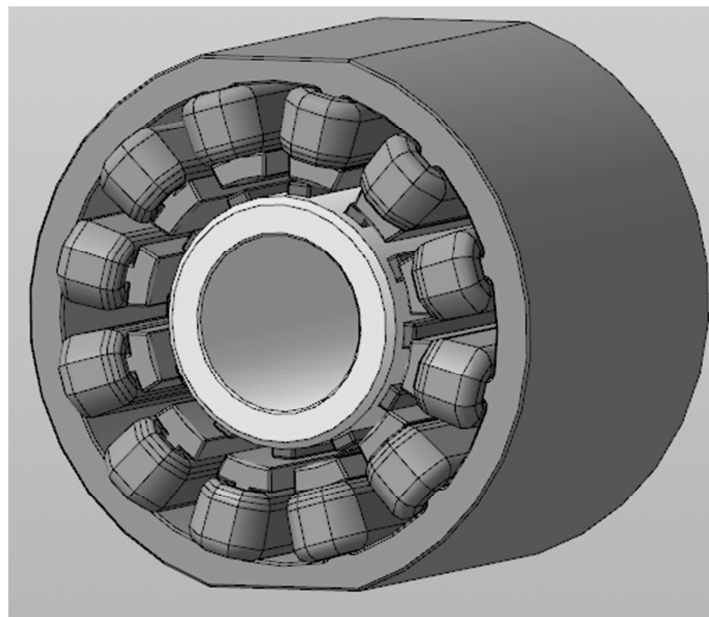


Рисунок 3.5 – Мотор-генератор на постійних магнітах

3.4 Магнітні підшипники

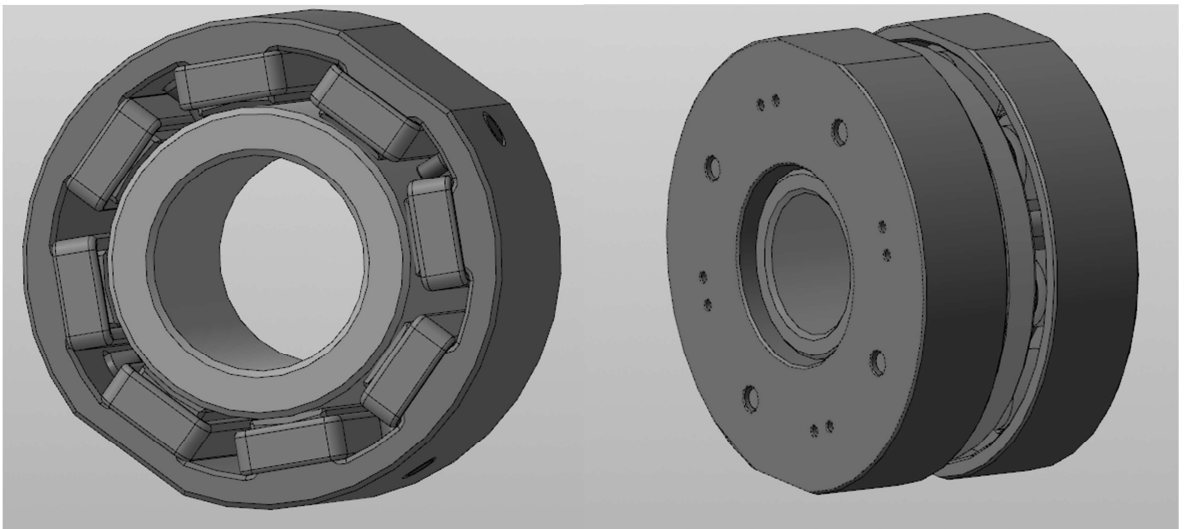
Магнітні підшипники вже давно використовуються у високошвидкісних турбінах, турбодетандерах та компресорах і є найкращим рішенням для роботи на високих швидкостях обертання. Використаємо в нашій конструкції магнітні підшипники фірми SKF модельного ряду S2M, які вже давно є на ринку та зарекомендували себе як просте та надійне рішення для навантажених вузлів та агрегатів. Активні магнітні підшипники здійснюють обертання валу без фізичного контакту з поверхнею, бо електромагніти розвивають зусилля в радіальному і осьовому напрямках для левітації валу, що забезпечує його обертання без тертя. Проектна швидкість обертання яких близька до 40 000 оборотів в хвилину. Магнітні підшипники SKF S2M надають можливість дистанційного керування, діагностики робочого стану та вібраційної діагностики, що спрощує щоденну експлуатацію. Крім того, магнітні підшипники SKF повністю герметичні і працюють без змащування, що є величезною перевагою при низько- та високотемпературних процесах (-130/+150°С).

Загальний вигляд таких підшипників (рисунок 3.6) та 3-д модель для нашої установки (рисунок 3.7) представлені нижче. Оскільки вал виконаний з сплаву титану який є парамагнетиком і не може відчутно притягуватись електромагнітами підшипника, передбачаємо сталеві втулки що будуть працювати в підшипниках на валу.



Джерело: <https://www.skf.com/>

Рисунок 3.6 – Магнітні підшипники загальний вигляд



а)

б)

Рисунок 3.7 – Магнітні підшипники 3–д модель:

а) радіальний, б) осьовий

3.5 Корпус

Корпус має виконувати функцію жорсткої основи для закріплення в ньому таких елементів як корпуси магнітних підшипників та статор мотор–двигуна, а також утримання з середини вакууму та запобігання руйнувань при аваріях маховика. Зазвичай корпуси виготовляють з чавуну чи сталей, а в випадках з високою небезпекою розриву маховика – багатошарові корпуси. Спроектований корпус, зображений на рисунку 3.8, складається з двох частин: основи та верхньої кришки.

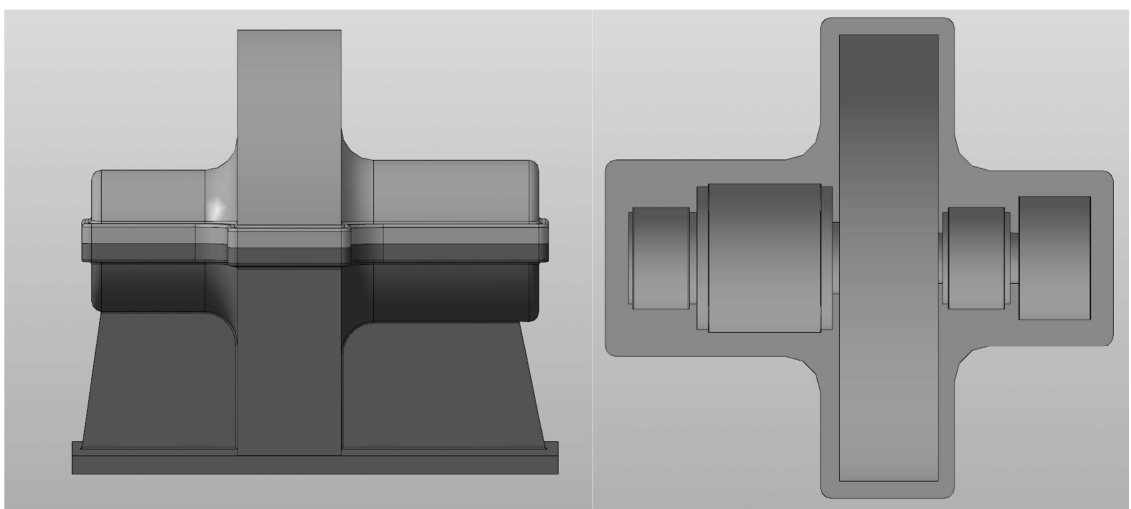


Рисунок 3.8 – Корпус супермаховика

3.6 Загальний опис отриманої конструкції

Підсумовуючи всі вище одержані деталі конструкції супермаховика маємо наступне (рисунок 3.9): основною несучою частиною виступає сталевий, розривобезпечний корпус (6) в якому знаходиться вал (4) маховика з сплаву титану на якому розміщено два радіальних (2) магнітних підшипника та один осьовий (1), мотор-генератор на постійних магнітах (3), перехідна титанова втулка на яку в свою чергу намотаний маховик з вуглецевого волокна (5). В середині корпусу створюється вакуум для зменшення тертя між повітрям та маховиком.

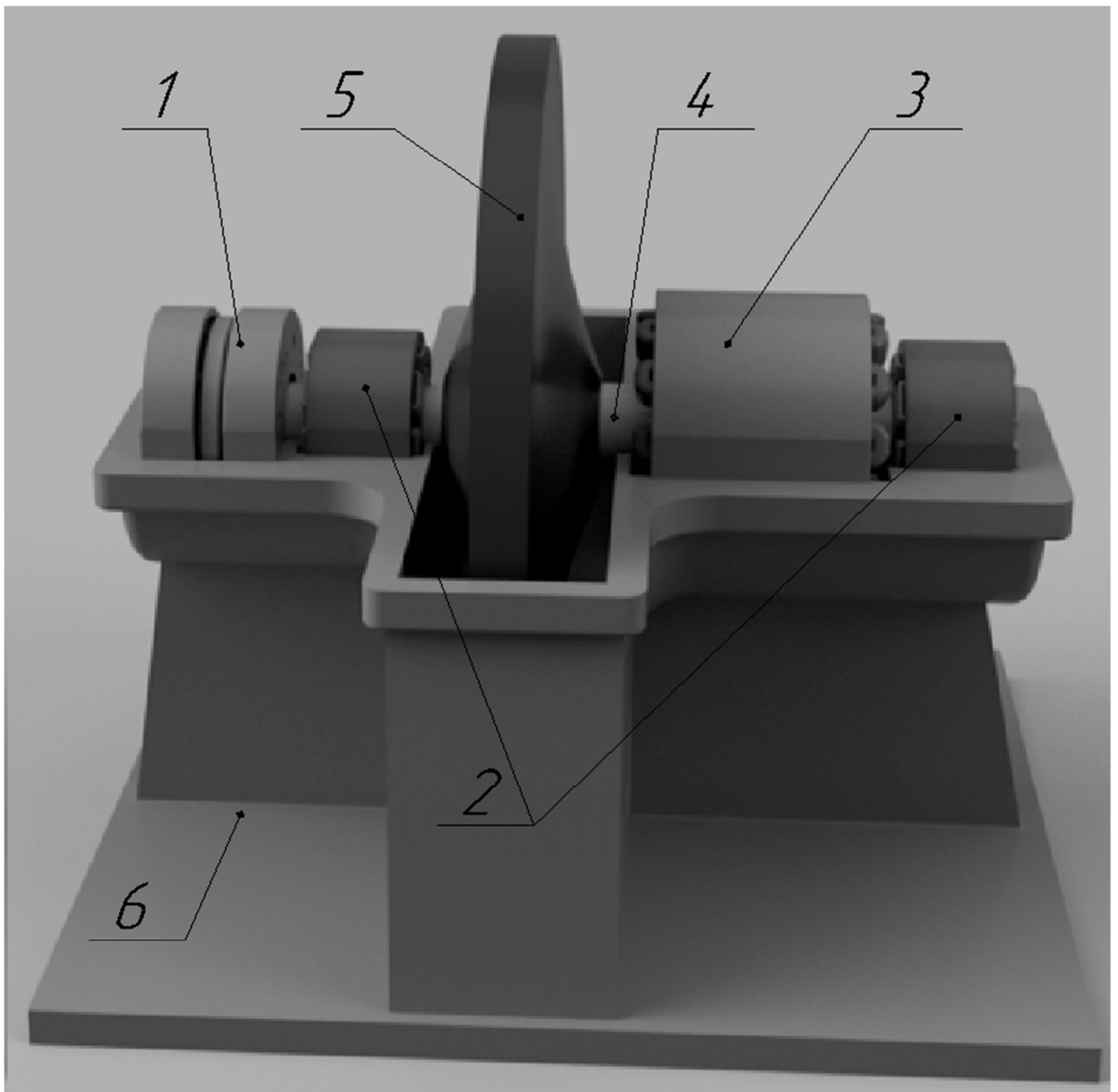


Рисунок 3.9 – Супермаховик (верхня кришка корпусу не показана)

3.7 Висновок

У розділі виконано розроблення конструкції та проведено підбір компонентів, матеріалів і комплектуючих, а також виконано конструювання окремих компонентів для виготовлення супермаховика згідно з поданими раніше рекомендаціями. Описано запропоновану конструкцію та принцип її дії, що дозволить у подальшому при використанні систем автоматизованого проектування створити твердотільні тривимірні моделі для подальших досліджень та аналізу.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

4.1 Передумови для виконання експериментальних досліджень

В сучасному світі всі технології направлені на полегшення праці людини та звільнення її від однотипної і монотонної роботи, щоб було більше часу на творчість. Оскільки всі механізми, машини чи їх частини потрібно спроектувати, сконструювати а потім ще й виготовити – це, зазвичай, займає дуже велику кількість часу та зусиль. Цим може займатися кожна людина, але більш досвідчений спеціаліст впорається набагато швидше ніж новачок. А проектування та конструювання дуже відповідальних деталей не можна довірити одній людині, якою досвідченою вона не була – ціна помилки може бути занадто високою. Тому в таких ситуаціях на допомогу приходять допоміжні інструменти систем автоматизованого проектування та розрахунків.

Саме такими інструментами є програмні системи скінченно–елементного аналізу. Вони можуть виконати аналіз стійкості та міцності, власної і вимушеної динаміки конструкції при статичних чи динамічних силових і температурних факторах, що впливають на систему. Це дає змогу забезпечити надійність та довговічність виробу ще на етапі конструювання, минаючи фазу ранніх прототипів об'єкта конструювання.

Оскільки супермаховик в процесі своєї роботи буде розміщено на виробництві, певні частоти вимушених коливань виникають в результаті рухів робочих органів, допоміжних процесів тощо. В свою чергу це викликає гармонічні коливання з певною періодичністю. Джерелами вільних коливань в механоскладальному цеху є джерела низьких частот. Тому дуже важливо уникати джерел коливань, що дають частоти коливань які є близькими до вільних коливань супермаховика.

Оскільки конструкція спроектованого пристрою піддається динамічним навантаженням, актуальним залишається проведення динамічного та частотного аналізу, який зменшить ризик появи резонансу.

Необхідно зазначити, що реальний прилад має нескінченну кількість частот власних коливань. Але, його математична модель обмежується кількістю частот, що відповідає кількості ступенів свободи, обумовлених характером контактів між елементами конструкції.

В нашому випадку визначати частоти власних коливань та їх форми (моди) використаємо принцип модального аналізу, який проведемо за допомогою інструментів програмної системи скінченно–елементного аналізу – Ansys Workbench, модуль Mechanical.

4.2 Чисельне моделювання конструкції супермаховика

Для проведення модального аналізу власних коливань конструкції супермаховика виконаємо побудову трьохвимірної твердотільної моделі за допомогою комплексу автоматизованого проектування – Компас–3Д (рисунок 4.1). Для скорочення часу проведення даного аналізу виконаємо спрощення моделі – виключимо з розрахунку моделі, які не мають контакту з валом маховика, адже магнітні підшипники не передають коливання на корпус через гарантований зазор і вакуум буде сприяти гашенню коливань; окремі вузли відобразимо як одне суцільне тіло.

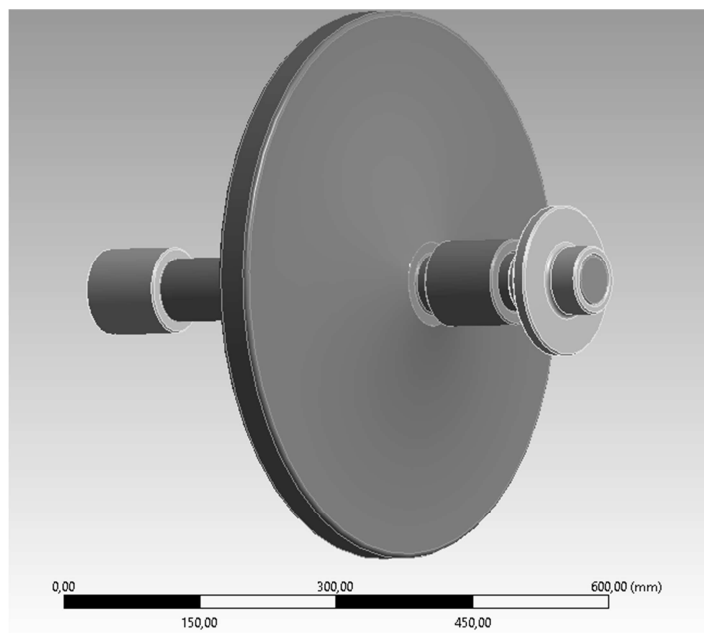


Рисунок 4.1 – Спрощена твердотільна модель для аналізу

Матеріал елементів конструкції приймаємо таким, як було вказано в попередньому розділі: середньо вуглецева сталь для втулок магнітних підшипників, титановий сплав Titanium Beta C для валу та втулки маховика, HexTow® AS4 – вуглецеве волокно для маховика.

Наступним етапом є побудова скінченно–елементної сітки (рисунок 4.2). Мінімальна довжина грані сітки рівна $8,36 \cdot 10^{-3}$ мм; кількість елементів сітки – 37995 шт.

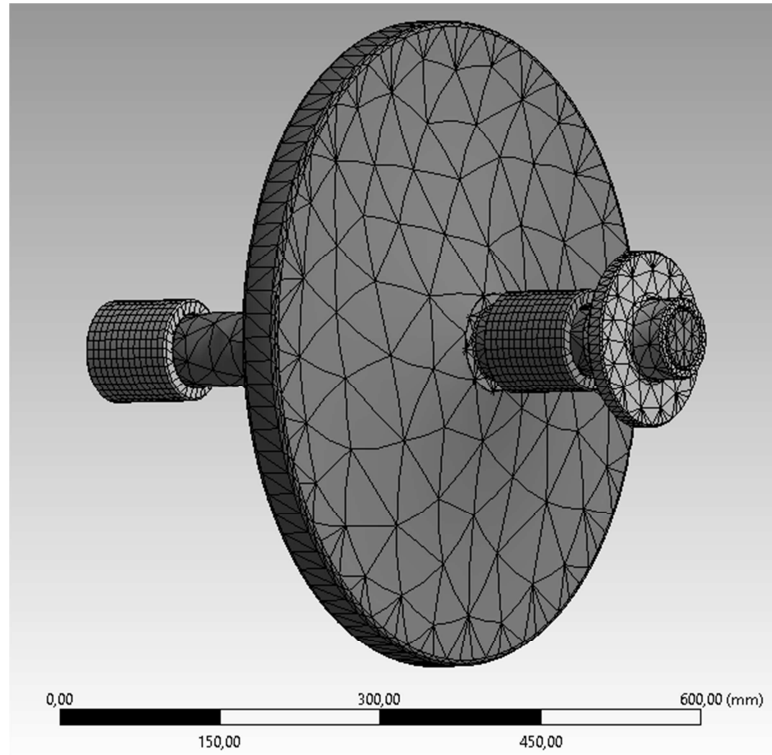


Рисунок 4.2 – Скінченоелементна сітка

Для забезпечення точних результатів аналізу – задаємо контактні сполучення, які присутні в моделі. Наприклад для елементів, що мають жорстке сполучення, наприклад, посадку з натягом, обираємо параметр – Bonded. У просторі система зафіксована за допомогою команди Fixed Support по поверхнях втулок підшипників, оскільки саме на них будуть діяти магнітні сили, що утримують ротор супермаховика.

У результаті розрахунку отримуємо графік, на якому відображені шість перших власних частот коливань (рисунок 4.3).

На практиці, найбільш небезпечними є перші три–чотири частоти власних коливань, оскільки вони мають найменшу величину, що може призвести до резонансу співпадіння частот вільних та вимушених коливань. З графіка бачимо, що для даної системи частоти знаходяться в межах 330–700 Гц.

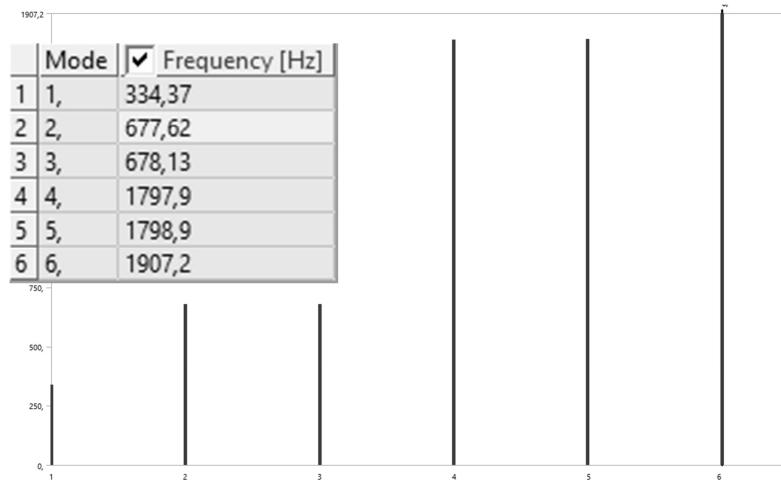


Рисунок 4.3 – Частоти власних коливань системи

На рисунках 4.44.6 відображені моди перших трьох форм власних коливань системи.

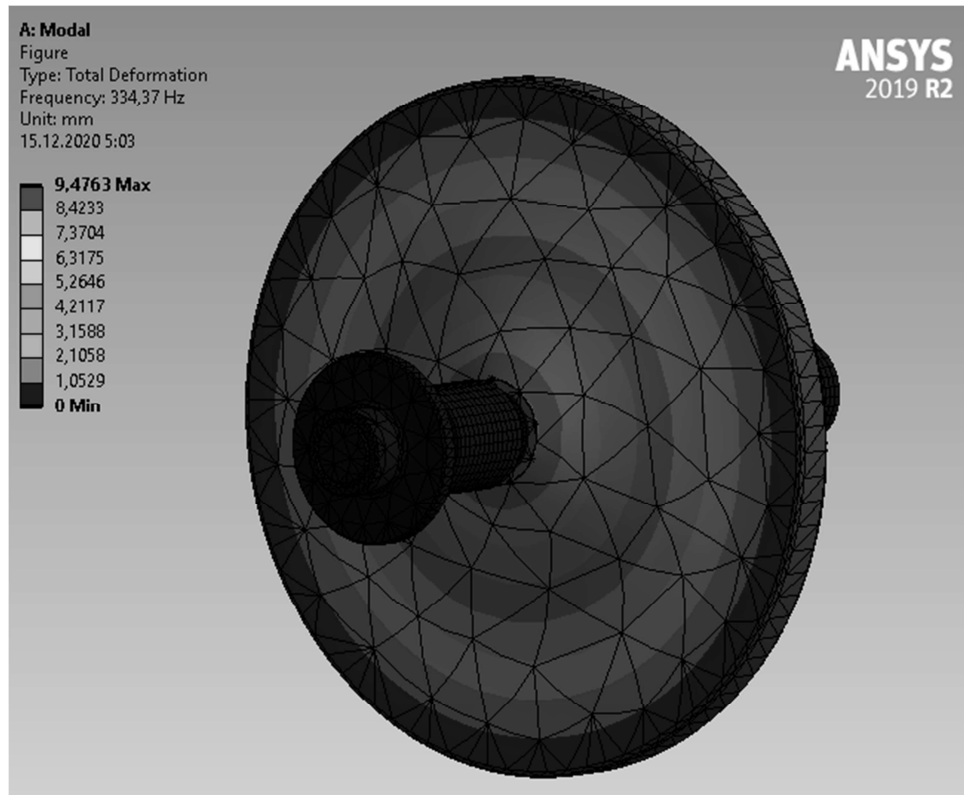


Рисунок 4.4 – Перша мода коливань

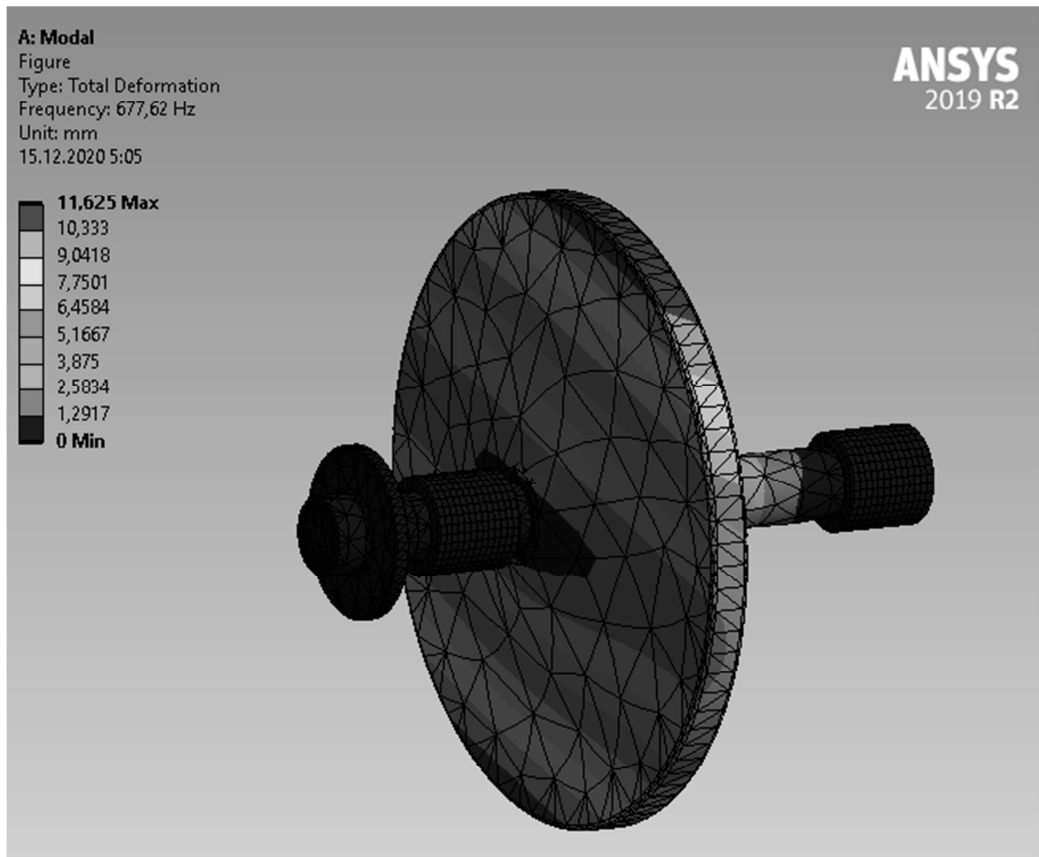


Рисунок 4.5 – Друга мода коливань

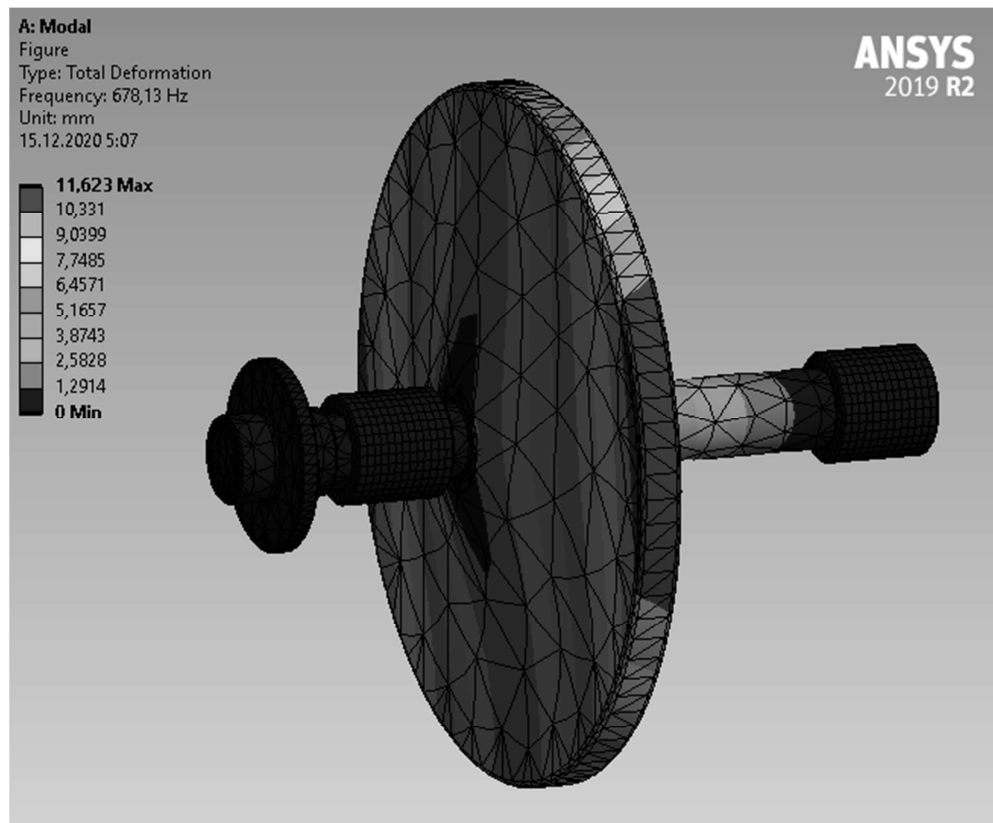


Рисунок 4.6 – Третя мода коливань

Як бачимо з аналізу, найбільш вразливим елементом даної конструкції є маховик, він деформується найбільше на всіх епюрах.

Для попередження виникнення резонансу, рекомендується уникати режимів роботи супермаховика, які можуть співпасти з частотами власних коливань системи. Для прикладу, 334,37 Гц приблизно дорівнює 20062 оберти за хвилину, а отже не допускати режимів роботи супермаховика більше ніж 20 тисяч обертів за хвилину для запобігання розриву чи деформації волоконної частини.

У даному випадку, модальний аналіз системи дозволив запобігти явищу резонансу внаслідок співпадіння власних частотних коливань з вимушеними. У випадку ж виникнення несприятливих умов – постає задача у коректуванні форми чи матеріалу супермаховика, або у повному перегляді конструкції установки в цілому.

4.3 Динамічне дослідження конструкції супермаховика

Наступним етапом розрахунків є проведення динамічного аналізу системи. Оскільки шляхом модального аналізу ми виявили максимально допустимий режим роботи супермаховика за частотою обертання, то можна провести аналіз сталості його роботи в цьому режимі. Через те, що динамічний аналіз потребує задання опор з силами їх реакцій та прикладення точкових мас, додамо до моделі повні моделі підшипників та перебудуємо скінчено елементну сітку (рисунок 4.7).

Режим роботи супермаховика полягає в циклічних навантаженнях розгону–гальмування, тому для перевірки стабільності роботи проведемо аналіз розгону від нуля до максимальних обертів, роботу на максимальних обертах та гальмування з максимальних обертів до нуля. При цьому будемо відслідковувати внутрішні напруження і деформації в тілі маховика.

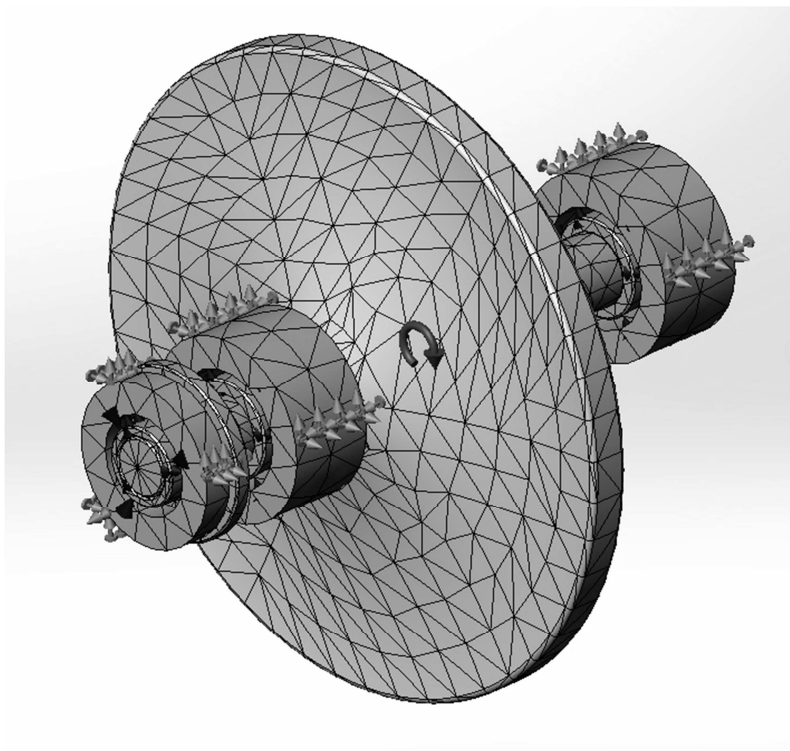


Рисунок 4.7 – Скінченоелементна сітка для динамічного аналізу

Будь-яка система рекуперації та акумулявання має швидко реагувати на зміну потужності в мережі і віддавати або забирати з неї енергію в пікові моменти. Тому обираємо час розгону/гальмування рівним одній секунді.

Результати аналізу представлені на рисунках 4.8 та 4.9.

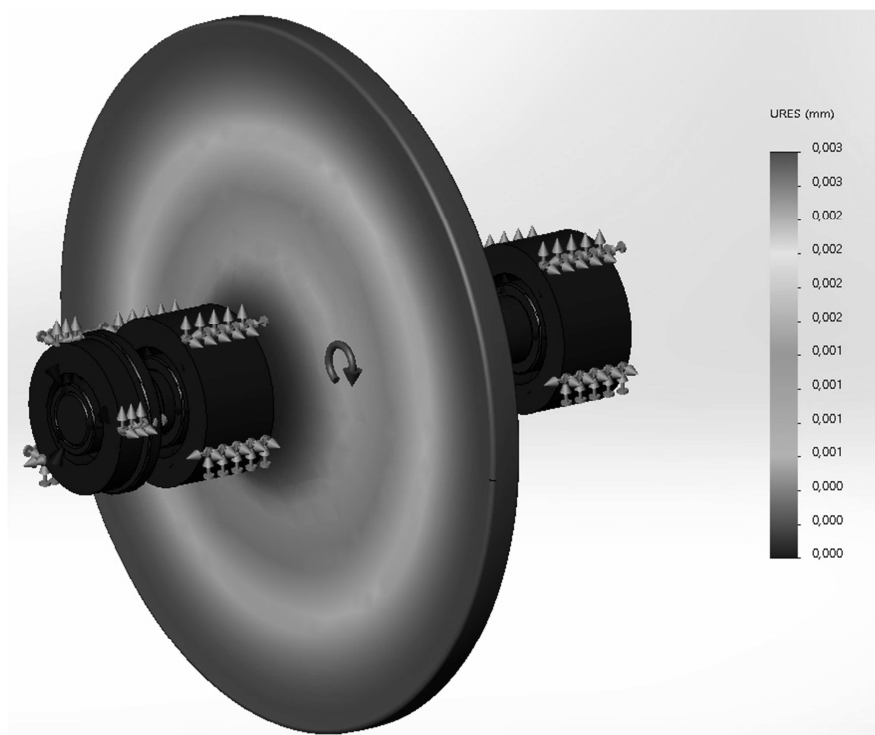


Рисунок 4.8– Максимальні деформації при динамічному навантаженні

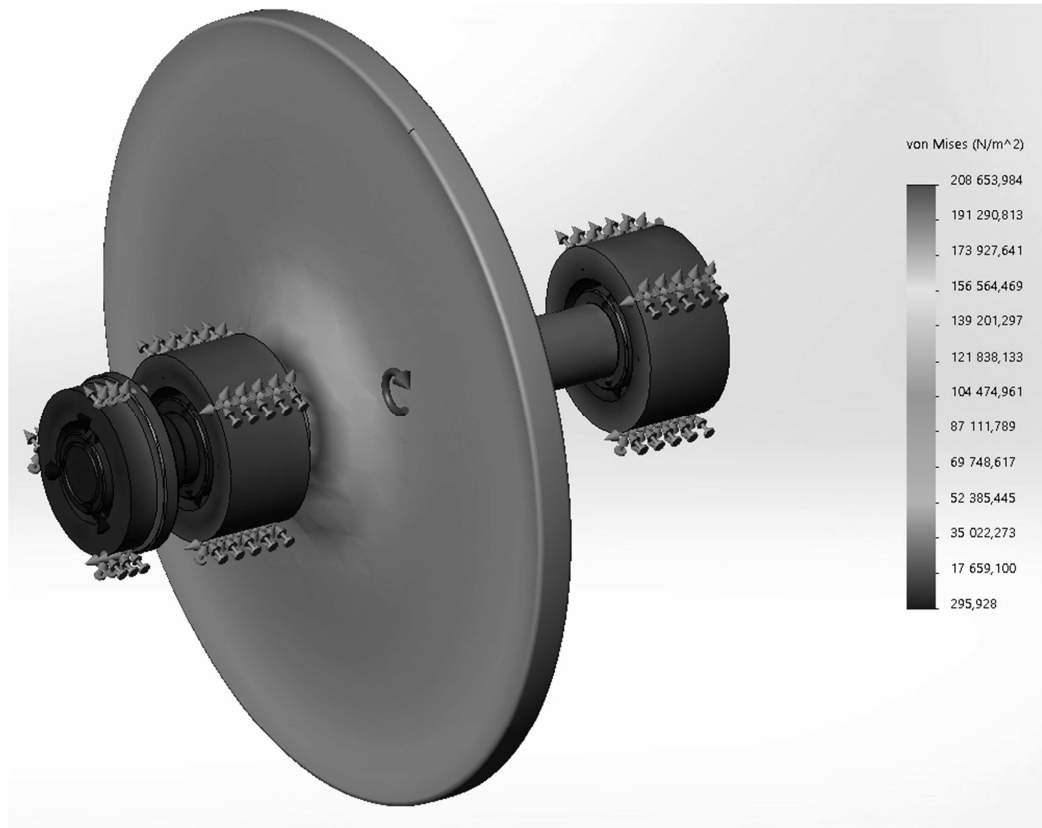


Рисунок 4.9 – Максимальні напруження, що виникають під час робочого циклу

З аналізу епюр бачимо, що при таких навантаженнях установка супермаховик може працювати в динамічному режимі заряду–розряду стабільно без ризику розриву маховика чи скручування валу, адже в такому режимі не виникають критичні напруження чи тотальні деформації.

Підсумовуючи всі дослідження можна підрахувати основні характеристики отриманої установки.

Максимальна частота обертання 20 000 об/хв.;

Швидкість заряду і розряду 1 секунда;

Максимальна енергія, що може бути збережена 33 кВт·год;

Кількість циклів заряду-розряду 20 000;

Строк служби 20 років.

4.4 Висновок

Проведений модальний та динамічний аналіз установки «супермаховик» дозволив встановити резонансні частоти, епюри критичних деформацій та напружень, а також підібрати оптимальні режими роботи конкретно для даної конструкції та підтвердити основні технічні характеристики, що були заявлені в технічному завданні.

Результати модального та динамічного аналізу дозволили встановити, що повністю властивості матеріалу не реалізовані, адже обмежуючим фактором виступили власні коливання конструкції, а не обмеження за міцністю композитного матеріалу. Тому у подальших дослідженнях модель потребує коригування форми та розмірів самого маховика.

РОЗДІЛ 5

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ РОЗРОБЛЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ СУПЕРМАХОВИКА

5.1 Оптимізація споживання енергії шляхом рекуперації

Сучасність диктує досить жорсткі правила використання енергетичних ресурсів у всіх сферах діяльності людини, і в подальшому ця проблема буде тільки зростати. Людство з кожним днем споживає все більше і більше ресурсів, левова частка яких є невідновними. Звісно, вирішенням даного питання науковці займаються вже давно, але майже всі рекомендації щодо підвищення енергоефективності зводяться до зменшення прямого споживання енергії та оптимізації її використання. І лише деякі методи пропонують повернення вже витрачених ресурсів, які іноді так потрібні. Цей метод називають рекуперацією.

Рекуперація – повернення частини матеріалів або енергії для повторного використання у тому ж технологічному процесі [23]. Дана технологія є перспективним напрямком на шляху до вирішення енергетичних проблем людства. Якщо розглянути процеси, які супроводжуються перетворенням одного типу енергії в будь-яку іншу, то з великою вірогідністю частину енергії можливо буде повернути назад в систему. Розглянемо, наприклад, рух автомобіля – його кінетична енергія під час гальмування перетворюється в теплову за рахунок тертя між гальмівними колодками та диском, чи гальмування асинхронного двигуна баластними резисторами – на них також виділяється тепло, скидання надлишкового тиску з повітряних магістралей в навколишнє середовище – стиснений газ може виконати роботу та ін..

Але замість того, щоб просто розсіювати цю енергію, її можливо повернути назад до мережі живлення з урахуванням поточних параметрів і це зменшить енерговитрати. Такі системи вже є, і вони використовуються. Великі компанії поступово впроваджують їх в свою продукцію. В основному, це стосується транспорту – легкові автомобілі, вантажівки, тролейбуси, метро,

залізниця. А працюють вони на системі рекуперативного гальмування – замість витрати кінетичної енергії на гальмування тертям, в трансмісію транспортного засобу (ТЗ) вмонтовують електричний двигун (зазвичай, реверсивної дії) який під час натискання на педаль гальм вмикається в роботу у якості генератора. Таким чином кінетична енергія перетворюється в електричну для подальшого використання. А коли швидкість ТЗ стає дуже малою, то спрацьовують фрикційні гальма і повністю зупиняють його. КПД таких установок залежить від дуже багатьох факторів, але основними є маса ТЗ, швидкість з якою рухається об'єкт та спроможність самої установки до швидкого відбору енергії.

Сучасні рекуперативні системи досягають ефективності в 70-75% на важких машинах і агрегатах – залізничні потяги, метрополітен та вантажівки. У легкових авто цей показник дещо менший і складає 50-60% для гібридних та електрокарів. На легких авто чи електричних мотоциклах ефективність рекуперації складає близько 30% через низьку масу та швидкості, з якими вони рухаються. Навіть на електричних самокатах впроваджують таку функцію, але вона має дуже низьку ефективність – близько 7% [24-28].

В машинобудуванні з легкістю можна впровадити дану технологію і економити на енергоресурсах, а отже зменшувати собівартість та збільшувати прибуток. Якщо взяти середнє чи важке машинобудування то повсюдно на металорізальному обладнанні є виконавчі органи, що в процесі роботи змінюють свою кінетичну енергію та працюють в режимі розгін-гальмування. Велика кількість двигунів можуть працювати в режимі генератора лише з включенням в його ланцюг живлення контролера рекуперації (див. розділ 2). А акумулятором енергії для такої системи може бути супермаховик.

5.2 Економічний розрахунок запропонованого методу

Проведемо укрупнений розрахунок можливої економії електроенергії на основі застосування рекуперативного гальмування для механоскладальних цехів.

Приймаємо вартість супермаховика 300 тис. гривень, коефіцієнт корисної дії візьмемо середній, близько 25%. Приймаємо потужність середнього верстату 15 кВт·год, середньорічний час роботи в дві зміни 4000 годин. Вартість одного кВт·год електроенергії – 3 грн.

Розрахуємо середньорічне споживання одним верстатом електроенергії:

$$4\,000 \text{ год} \cdot 15 \text{ кВт} = 60\,000 \text{ (кВт·год)}, \text{ або}$$

$$60\,000 \text{ кВт·год} \cdot 3 = 180\,000 \text{ (грн.)}$$

Звідси знайдемо кількість витраченої енергії з урахуванням рекуперації:

$$60\,000 \text{ кВт·год} \cdot 0,75 = 45\,000 \text{ (кВт·год)}, \text{ або}$$

$$45\,000 \text{ кВт·год} \cdot 3 = 135\,000 \text{ (грн.)}$$

Середньорічна економія на електроенергії складає:

$$180\,000 \text{ грн} - 135\,000 \text{ грн} = 45\,000 \text{ (грн.)}$$

При заявленій вартості установки 300 000 грн термін окупності при незмінній ціні на електроенергію складає:

$$300\,000 \text{ грн} / 45\,000 \text{ грн} = 6,67 \text{ (років)}$$

Оскільки заявлений строк служби складає 20 років то вже майже через сім років така система почне приносити прибуток, а при умові стабільного росту тарифів на електроенергію, ще раніше. Також слід зазначити, що для важкого машинобудування така система є більш ефективною і, відповідно, швидше почне приносити прибуток. Ще одним фактором виступає універсальність застосування та можливість встановлення чи зняття з

найменшими втручаннями в систему верстату, невибагливістю в експлуатації та необхідності частого обслуговування.

5.3 Висновок

Запропонована система економії енергії на базі рекуперативного гальмування є перспективним напрямком розвитку енергосистем. Розроблену конструкцію механічного накопичувача енергії може бути застосовано в багатьох галузях господарства і машинобудування України. Укрупнений розрахунок енергоефективності впровадження показав економічно вигідне застосування даної технології в механоскладальних цехах, при чому встановлено, що більші споживані потужності дають більші можливості відновлення електроенергії та зменшення собівартості і навпаки збільшення прибутку, що дозволить конкурувати підприємствам України на світових ринках машинобудівної продукції за інших рівних умов.

ВИСНОВКИ

1. На основі проведеного аналізу сучасного стану розробок в галузі проектування та застосування супермаховиків було виділено основні принципи та алгоритми конструювання, вибору комплектуючих і деталей для виготовлення супермаховиків, а також вимоги які до них ставлять та в яких галузях застосовують ті чи інші розробки, що дозволило перейти до процесу проектування власної конструкції супермаховика для його застосування у машинобудуванні.

2. На основі розглянутих методик запропоновано алгоритм проектування та конструювання супермаховиків для машинобудівної галузі. Описано основні елементи конструкції, виділені критерії підбору комплектуючих, наведено рекомендації для вирішення поставлених задач супермаховиків, що дозволило перейти до компонування запропонованої конструкції.

3. Базуючись на алгоритмі та рекомендаціях, було спроектовано та сконструйовано супермаховик, створені його 3-д моделі для подальшого аналізу та досліджень, що дозволило запропонувати варіант технологічного, простого, надійного і довговічного накопичувача енергії для підвищення енергоефективності механоскладальних цехів.

4. Проведено аналіз конструкції супермаховика методом скінчених елементів в процесі роботи та динамічний аналіз стійкості системи під робочим навантаженням в програмному середовищі Ansys Workbench. Було виявлено моди коливань, що дозволить попередити появу резонансу та встановлено, що гранична частота обертання обмежується лише конструкцією супермаховика, а композитний матеріал може витримати суттєво більші навантаження.

5. Розраховано економічний ефект від впровадження системи рекуперативного гальмування для середнього та важкого машинобудування, що дозволило визначити строк окупності та підтвердити ефективність розробленого технічного рішення.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. De collectie van het Vlaams Tram- en Autobusmuseum (каталог Фламандского музея трамваев и автобусов), стр. 46—47.
2. Гулиа Н. В. Удивительная механика: В поисках «энергетической капсулы». — М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. — 176 с. : ил. — (О чём умолчали учебники).
3. Разрывобезопасный волоконный супермаховик №217.015.7904 РосПАТЕНТ
4. Циклические испытания накопителя кинетической энергии большой мощности и энергоёмкости. Гулиа Н. В., Кацай А. В. НиТ, 4 декабря 2012 года
5. Vafakhah, B.; Masiala, M.; Salmon, J.; Knight, A. Emulation of flywheel energy storage systems with a PMDC machine. In Proceedings of the 18th IEEE International Conference on Electric Machines, Vilamoura, Algarve, Portugal, 6–9 September 2008; pp. 1–6.
6. Liu, H.; Jiang, J. Flywheel energy storage — An upswing technology for energy sustainability. *Energy Build.* 2007, 39, 599–604.
7. Hebner, R.; Beno, J.; Walls, A. Flywheel batteries come around again. *IEEE Spectr.* 2002, 39, 46–51.
8. Bolund, B.; Bernhoff, H.; Leijon, M. Flywheel energy and power storage systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2007, 11, 235–258.
9. Sebastián, R.; Alzola, R.P. Flywheel energy storage systems: Review and simulation for an isolated wind power system. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2012, 16, 6803–6813.
10. Emadi, A.; Nasiri, A.; Bekiarov, S.B. *Uninterruptable Power Supplies and Active Filters*; Illinois Institute of Technology: Chicago, IL, USA; CRC Press: Washington, DC, USA, 2005.
11. Sabihuddin, S.; Kiprakis, A.; Mueller, M. A Numerical and Graphical Review of Energy Storage Technologies. *Energies* 2014, 8, 172–216.

12. Farhadi, M.; Member, S.; Mohammed, O. Energy Storage Technologies for High-Power Applications. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2016, 52, 1953–1961.
13. Daoud, M.I.; Abdel-Khalik, A.S.; Massoud, A.; Ahmed, S.; Abbasy, N.H. On The Development of Flywheel Storage Systems for Power System Applications: A Survey. In *Proceedings of the 20th International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Marseille, France, 2–5 September 2012; pp. 2119–2125.
14. Kenny, B.H.; Kascak, P.E.; Jansen, R.; Dever, T. Control of a High Speed Flywheel System for Energy Storage in Space Applications. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2005, 41, 1029–1038.
15. Pena–Alzola, R.; Sebastián, R.; Quesada, J.; Colmenar, A. Review of Flywheel based Energy Storage Systems. In *Proceedings of the 2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, Malaga, Spain, 11–13 May 2011.
16. Yu, Y.; Wang, Y.; Sun, F. The Latest Development of the Motor/Generator for the Flywheel Energy Storage System. In *Proceedings of the 2011 International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC)*, Jilin, China, 19–22 August 2011; pp. 1228–1232.
17. Awadallah, M.A.; Venkatesh, B. Energy Storage in Flywheels: An Overview Le stockage dénergie dans les volants: Apercu. *Can. J. Electr. Comput. Eng.* 2015, 38, 183–193.
18. Zhang, C.; Tseng, K.J. Design and control of a novel flywheel energy storage system assisted by hybrid mechanical–magnetic bearings. *Mechatronics* 2013, 23, 297–309.
18. Truong, L.V.; Wolff, F.J.; Dravid, N.V. Simulation Of Flywheel Electrical System For Aerospace Applications. In *Proceedings of the 35th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference and Exhibition*, Las Vegas, NV, USA, 24–28 July 2000; Volume 1, pp. 601–608.
19. Babuska, V.; Beatty, S.; DeBlonk, B.; Fausz, J. A review of technology developments in flywheel attitude control and energy transmission systems. In

- Proceedings of the 2004 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 6–13 March 2004; Volume 4, pp. 2784–2800.
20. Bitterly, J.G. Flywheel technology past, present, and 21st century projections. In Proceedings of the Thirty–Second Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (IECEC–97), Honolulu, HI, USA, 27 July–1 August 1997; Volume 4, pp. 2312–2315.
21. US Department of Energy Global Energy Storage Database. Available online: <http://www.energystorageexchange.org/projects> (accessed on 1 February 2017).
22. US Marine Corps Utilising Microgrid Energy Storage Project. Available online: <http://www.decentralizedenergy.com/articles/2015/09/us-marine-corp-utilising-microgrid-energy-storage-project.html>
23. СЛОВНИК – ДОВІДНИК З ЕКОЛОГІЇ: Навчально-методичний посібник / О. Г. Лановенко, О. О. Остапішина. – Херсон: П. П. Вишемирський В.С., 2013. – 226 с.
24. Астахов, Ю. Н. Накопители энергии в электрических системах [Текст]: учеб.пособие для электроэнерг. спец. вузов / Ю.Н. Астахов, В.А. Веников, А.Г. Тер-Газарян. – М.:Высш. школа, 1989. – 159 с.
25. Колб, А. А. Аккумуляция энергии рекуперации электрифицированного транспорта с помощью емкостных энергонакопителей [Текст] / А.А. Колб // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізнич. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2010. –Вип. 31. – С. 89-94.
26. Родькин, Д. И. Особенности осуществления электропривода с накопителями энергии [Текст] / Д.И. Родькин, Т.В. Величко // Наукові праці Кременчуцького держ.політехн. ун-ту. – Кременчук: КДПУ, 2000. – Вип. 2/2000 (9). – С. 124-132.
27. Костин, Н. А. Автономность рекуперативного торможения – основа надежной энергоэффективной рекуперации на электроподвижном составе постоянного тока [Текст] / Н.А. Костин, А.В. Никитенко // Залізничний транспорт України. – 2014. – No 3. – С. 15–23.

28. Фомін О. В. Визначення раціональних параметрів ємнісного накопичувача енергії для рухомого складу метрополітену [Електронний ресурс] / О. В. Фомін, А. О. Сулим, П. О. Хозя // Восточно-Европейский журнал передовых технологий ISSN 1729-3774. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://media.neliti.com/media/publications/307564-determiningrational-parameters-of-the-c-be59a91a.pdf>.
29. ДСТУ 2890 Тара і транспортування.
30. ДСН 3.3.6.042–99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
31. Естественное и искусственное освещение: ДБН В.2.5–28:2018.
32. ДСН 3.3.6.039 Державні санітарні норми виробничої, загальної та локальної вібрації.
33. ДСН 3.3.6.037–99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
34. ДСТУ Б В.1.1–36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою.
35. ГОСТ 12.0.003–2015 Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
36. 12.3.002–2014 ССБТ Процессы производственные. Общие требования безопасности.
37. ДБН В.2.3–4:2015 Автомобільні дороги. Частина 1. Проектування.
38. ГОСТ 12.1.030–81 ССБТ Електробезпека. Захисне заземлення. Занулення.
39. 61. ГОСТ 12.4.275–2014 Средства индивидуальной защиты органа слуха. Общие технические требования.
40. ДБН Д.2.6–3–2000. Системы вентиляции и кондиционирования воздуха.
41. ДБН В.2.5–56:2014 Системи протипожежного захисту.
42. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення.
43. НАПБ А.01.001–2014 Правила пожежної безпеки України.
44. ДБН В.1.1–7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. ДСТУ 3810–98 Пожежна техніка. Рукава пожежні напірні. Загальні технічні умови.
45. СНиП 31–03–2001. Производственные здания