

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

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

### Розробка фрикційного електроприводу для велосипеда

Галузь знань 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Шифр БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 4 курсу групи ЕТ-21-1	 Підпис	Святушенко М.С. Ініціали, прізвище
Керівник	 Підпис, дата	Д.т.н., проф. Поліщук О.С. Ініціали, прізвище
Нормоконтролер	 Підпис, дата	К.т.н. доц. Тимошук О. Ініціали, прізвище
До захисту допускаю: Зав. кафедри МАЕЕС	 Підпис, дата	к.т.н., доц. Неймак В.С. Ініціали, прізвище


2 06 2025 р.

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАЕЕС

  
\_\_\_\_\_  
2. 06 2025

## ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ Святушенко Михайло Сергійович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи **Розробка фрикційного електроприводу для велосипеда**

керівник роботи **Поліщук О.С., д.т.н, професор**

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

Затверджено наказом ректора університету від 7 02 2025 р. № 23

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 2.06.25

3. Вихідні дані до роботи: **технічні характеристики**

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

**1 Огляд існуючих технологічних і технічних рішень з тематики бакалаврської роботи**

**2 Розробка електроприводу для велосипеда**

**3 Розрахунки, що підтверджують працездатність конструкції електровелосипеда.**

**4 Практична реалізація кріплення мотор-колеса до рами велосипеда і стабілізатора напруги електровелосипеда**

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

Аркуш 1. Електроприводи велосипедів. Документ оглядовий (A1).

Аркуш 2. Електропривід велосипеда. Схема структурна (A2)+. Аркуш 3.

Схема керування електроприводом велосипеда. Схема електрична принципова (A2). Аркуш 4. Електропривід велосипеда. Складальне креслення (A1). Аркуш 5. Електропривод велосипеда Документ

дослідницький (A1). Аркуш 6. Електропривод велосипеда. Результати розрахунків. Документ дослідницький (A1).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1 Огляд наявних електроприводів, і комплектуючих до електровелосипеду	20.05.25р.	
2 Розробка електропривода для велосипеда	01.06.25р.	
3 Розрахунки, що підтверджують працездатність конструкції електровелосипеда	07.06.25р.	
4 Практична частина	15.06.25р.	

Студент

Света  
Підпис

Светуленко  
Ініціали, прізвище

Керівник роботи

[Signature]  
Підпис

Толішук О.С.  
Ініціали, прізвище

# АНОТАЦІЯ

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

1. Прізвище, ім'я та по батькові **Святушенко Михайло Сергійович**

---

2. Тема бакалаврської роботи **Розробка фрикційного електроприводу для велосипеда**

---

---

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

---

4. Об'єм кваліфікаційної роботи: креслень 5 арк., сторінок записки 67

5. Метою є розробити надійний електропривід, у якого будуть переваги прямоприводного і редукторного моторколеса.

У роботі розроблений електропривід, кріплення якого реалізує основну перевагу редукторного моторколеса.

Розроблено концепцію електропривода, стабілізатора напруги, який буде заряджати акумулятор при їзді з пагорбів. Проведено розрахунок необхідного акумулятора, моторколеса. Розраховано привід в SOLIDWORKS Simulation, і проведено оптимізацію.

Протестовано електропривід. Він показав енергоефективний результат. Протестовано стабілізатор напруги, який повністю відповідає необхідним умовам.

Підпис студента 

" 2 " 06 2025 р.

## РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 2 від " 17 " 06 2025 р.

Оцінка проекту ЕК 5,0/A

Рекомендації ЕК впровадження у виробництво

---

---

Особливі відмітки —

Технічний секретар 

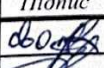



" 17 " 06 2025 р.

## ЗМІСТ

Стор.

Вступ.....	6
1 Огляд наявних електроприводів, і комплектуючих до електровелосипеду.....	8
1.1 Типи двигунів електровелосипеда.....	8
1.2 Типи контролерів для електродвигунів.....	12
1.3 Типи акумуляторів для електровелосипедів.....	17
1.4 Класифікація балансірів для акумулятора.....	19
1.5 Висновки до першого розділу.....	22
2 Розробка електропривода для велосипеда.....	25
2.1 Вибір напрямку проектування і конструктивних рішень.....	25
2.2 Розробка варіантів структурних схем побудови пристрою та прийняття напрямку його вирішення.....	26
2.3 Розробка електроприводу.....	30
2.4 Розробка стабілізатора напруги для заряду акумуляторів в режимі динамічного гальмування.....	31
2.5 Висновки до другого розділу.....	34
3 Розрахунки, що підтверджують працездатність конструкції електровелосипеда.....	36
3.1 Розрахунок ємності акумулятора.....	36
3.2 Розрахунок потужності мотор-колеса.....	37
3.3 Розрахунок електропривода в SolidWorks Simulation.....	41
3.4 Висновки до третього розділу.....	52
4 Практична частина.....	54
4.1 Тестування електроприводу.....	54

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
					Розробка фрикційного електроприводу для велосипеда		
Розроб.		Святушенко			Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Поліщук				4	64
Реценз.					ХНУ зр. ЕТ-21-1		
Н. Контр.		Телешук					
Затверд.		Неймак					



## ВСТУП

Використання електротранспорту в 21 столітті є дуже актуальним, адже має дуже багато переваг, а саме немає викидів в атмосферу відпрацьованих газів, у яких міститься більше 200 різних шкідливих речовин в тому числі і свинець. Електротранспорт дуже енергоефективний, тому що ККД електродвигунів 80 і більше відсотків. Немало важливим фактором є відсутність шумового забруднення, а також висока надійність, необхідне мінімальне обслуговування.

Електромобілі розробляли ще в 20 столітті, але із-за відсутності акумуляторів з високою енергоємністю, електротранспорт майже не використовувався. В той час були лише свинцево-кислотні і нікелькадмієві акумулятори, які важкі, мають малу енергоємність, свинцево - кислотні, мають малу кількість циклів перезаряду. Ni-Cd акумулятори були надійні, але мали ефект пам'яті, і небезпечні при неправильній зарядці. Також нікелькадмієві акумулятори мають дуже токсичний кадмій, який дуже небезпечний для людини. При тривалій експлуатації він може розгерметизуватися і кадмій попаде назовні. Такий тип акумуляторів потрібно правильно утилізувати, щоб не забруднювати навколишнє середовище. Але на початку 21 століття, розробили Li-ion акумулятори, це стало наступним кроком у розвитку електротранспорту.

Останніми роками почали набувати популярність електровелосипеди, адже вони легкі, мають максимальну швидкість до 100 км/год. Не потрібні права і реєстрація для водіння, можливість пересування, там де і звичайні велосипедисти, енергоефективні, надійні. Потрібне мінімальне обслуговування.

Основна проблема заключається у вартості готових електровелосипедів, низька надійність готових акумуляторних збірок, бо в більшості випадках приміняють елементи, які відпрацювали свій ресурс, а до втрати ємності залишається приблизно 100 циклів, також мотор-колеса із - за спицьовки в обід не дуже ефективні, тому що рідко працюють при номінальних обертах, а

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

також вартість готових мотор-колів висока із-за попиту на електровелосипеди і пошкодження постійних магнітів, із за ударів, також для найпопулярніших редукторних мотор-колів - це відсутність рекуперативного гальмування, для зарядки акумулятори при спуску велосипеда з пагорба.

Потрібно розробити надійний електропривід, у якого не буде можливості пошкодження постійних магнітів, зробити його більш енергоефективнішим, усунути можливість пошкодження постійних магнітів ротора, використати мотор-колесо краще за характеристиками, ніж велосипедне, але, щоб за вартістю було набагато дешевше, розробити систему динамічного гальмування, щоб заряджати акумулятор при спуску.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 ОГЛЯД НАЯВНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ І КОМПЛЕКТУЮЧИХ ДО ЕЛЕКТРОВЕЛОСИПЕДУ

## 1.1 Типи двигунів електровелосипеда

Найпоширенішими двигунами в електровелосипедах є прямоприводне мотор-колесо і редукторне. Опишемо детальніше кожен з них.

Редукторні двигуни ( аркуш [БРМА 25.03.00.000 ДО] ) мають планетарну передачу. Вона передає оберти мотор-колеса на колесо з коефіцієнтом редукції (зазвичай 1/5). Завдяки цьому збільшується крутний момент колеса, особливо це відчувається на малих обертах. Сьогодні мотор-колеса з потужністю до 350 Вт виготовляються редукторними (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 - Редукторне мотор-колесо

У зв'язку з редуктором максимальна швидкість буде обмеженою в 25-40 км/год, відповідно до потужності мотор-колеса. Редуктор складається з планетарної передачі і трьох полікарбонатних шестерень. Ресурс шестерень залежить від експлуатації, а також від виробника, в середньому ресурс шестерень 30000км-50000км.

Сталеві шестерні на редукторні двигуни ставлять рідко, тому що вони шумні, мають більшу вагу, але ресурс у них буде значно більшим.

Редукторний двигун не створює опір при їзді тільки на педалях і це є

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

основною перевагою цього типу двигунів. Обгонна муфта надає зворотний накат велосипеда, вона від'єднує автоматично електродвигун від колеса.

Редукторні мотор-колеса випускають потужністю від 250 Вт до 1.5 кВт [1].

Переваги:

- компактність;
- мала вага [1];
- відсутність опору при їзді тільки на педалях;
- низька вартість [2];
- висока ефективність в великому діапазоні швидкостей [2].

Недоліки:

- відсутність рекуперації;
- шум шестерень;
- обмежений ресурс шестерень [1].

Для міста достатньо для пересування мотор-колеса 350W. Для гірської місцевості необхідний двигун від 500 Вт і більше, в залежності від рельєфу.

Прямопривідні є найнадійнішими, у яких ресурс обмежується підшипниками. У прямоприводних мотор-коліс крутний момент менший, ніж у редукторних, але максимальна швидкість більша. Це означає на такому типі двигунів є можливість розганятись до більшої максимальної швидкості, але розгін буде плавніший, ніж в редукторних мотор-коліс. Також при підйомах на пагорби прямопривідні мотор-колеса будуть підніматись повільніше, ніж редукторні (тому прямопривідні мотор-колеса виготовляють з потужністю від 500Вт до 10кВт).

Вагомою перевагою прямоприводних мотор-коліс - це рекуперативне гальмування при їзді з пагорбів, але ця перевага є й недоліком, тому що рекуперативне гальмування буде сильно гальмувати велосипедиста при їзді тільки на педалях.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

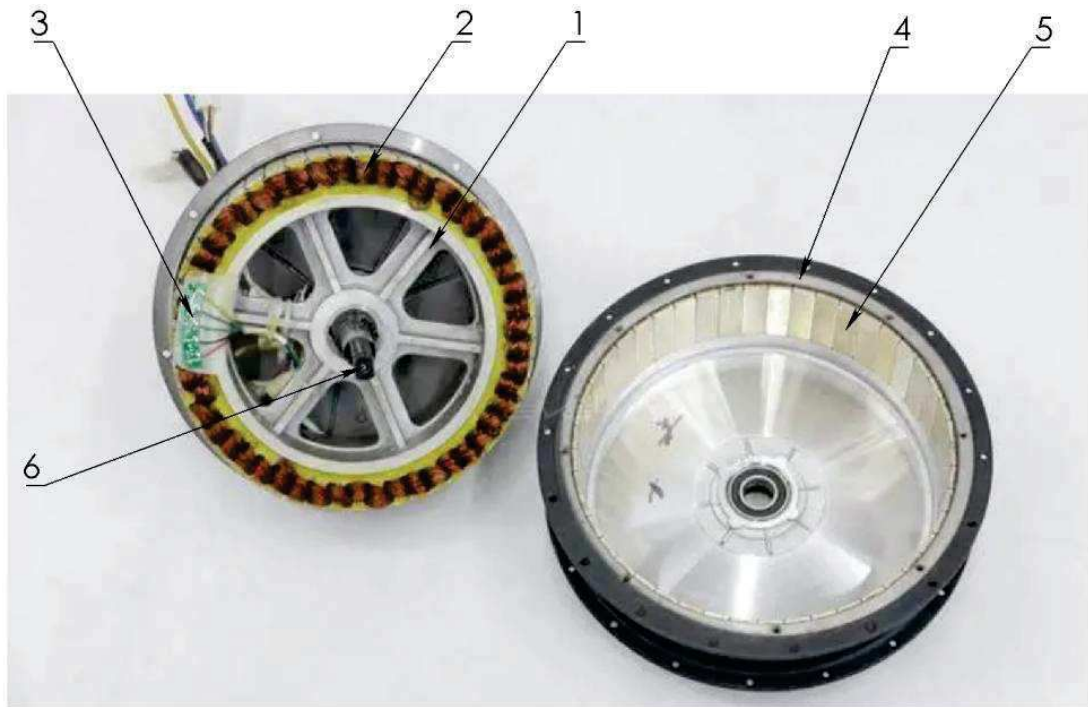


Рисунок 1.2 - Прямоприводне мотор-колесо

Прямоприводне мотор-колесо (аркуш [БРМА 25.03.00.000 ДО] ), зображене на рис.1.2 Воно складається з статора 1 і ротора 4. На статорі в пазах розміщена обмотка 2. На роторі наклеєні постійні неодимові магніти 5. Для визначення положення двигуна використовуються давачі Холла 3 [1].

Переваги:

- проста конструкція;
- низький шум;
- висока надійність;
- рекуперація.

Недоліки:

- велика вага 4-7 кг [1];
- великі габарити;
- опір педалюванню [1];
- коштує дорожче редукторного.

Прямоприводні мотор-колеса зазвичай використовують у потужних електровелосипедах, без допомоги педалювання [1].

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

Можливе встановлення мотор-колеса на переднє або на заднє колесо велосипеда. На передньому колесі велосипеда можливе пробуксовування колеса, а також руль стає важким, і велосипедом важче керувати. При встановленні на заднє колесо, двигун майже не відчувається, пробуксовування відсутнє.

Електричний велосипед з проміжним двигуном ( аркуш [БРМА 25.03.00.000 ДО] ) ще називають електричним велосипедом з концентратором [3]. Двигун розміщений в центрі велосипеда [3]. Але потужність електродвигуна обертає заднє колесо ланцюгової передачі управління [3]. В даний час технологія колекторного двигуна є широко застосовуваною технологією в електричних велосипедних двигунах [3].

Технологія проміжного двигуна вимагає більше обслуговування [3].

Загальна продуктивність та крутний момент середнього електричного велосипеда, як правило, кращі, ніж переднього або заднього електричного велосипеда [3]. Середній приводний двигун приводить в рух кривошип замість коліс, роблячи електровелосипед більш збалансованим порівняно з передніми та задніми електродвигунами [3].



Рисунок 1.3 - Середній привод електродвигуна [3]

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Переваги:

- живлення постійним струмом [1];
- не порушує центр мас велосипеда [1];
- простота монтажу;
- високий крутний момент, завдяки переключення передач [1].

Недоліки:

- невеликий термін служби через наявність колектора і щіток [1];
- шумний.

## 1.2 Типи контролерів для електродвигунів

Контролери за призначенням поділяються на: для двигунів синхронних (мотор-коліс), двигунів постійного струму (найчастіше середній привід).

Для мотор-коліс контролери класифікуються за формою керуючого сигналу:

- Найдоступніші і найдешевші у виробництві - це меандрові, вони мають на виході прямокутний сигнал. Основним недоліком в них є не дуже високий ККД - 75% - 80%, у зв'язку з вищими гармоніками, які перетворюються у мотор-колесі в тепло. Із-за цього мотор-колесо сильніше нагрівається, більше шумить, і строк експлуатації знижується. Але контролери дуже дешеві. Ціна від 8 доларів, що є ідеальним варіантом для б'юджетних електровелосипедів.

- Синусний контролер (рис 1.4) найефективніше керує синхронними електродвигунами. При керуванні втрати мінімальні, тому що контролер видає чисту синусоїду і відсутні вищі гармоніки. ККД 90 - 95%, що є найенергоєфективнішим рішенням. З таким типом контролерів мотор-колесо прослужить найдовше. Недоліком таких контролерів є ціна, вони як правило в 3-4 рази дорожчі від контролера з прямокутними імпульсами.

- Існують також контролери з модифікованою синусоїдою. Такі контролери мають кращі характеристики, ніж меандрові і підходять для б'юджетних і середньоб'юджетних електровелосипедів.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12



Рисунок 1.4 - Універсальний синусний контролер

Мотор-колеса можуть працювати без датчиків Холла. Для цього контролер використовує зворотню ЕРС.

Переваги керування мотор-колесом без датчиків Холла :

- простіша конструкція, тому що необхідно підключити тільки три фазних провoda.

Мінуси:

- контролери не так точно керують мотор-колесом;

- мотор-колесо може перегружитися і обмотки згорять.

Найкращий варіант використовувати контролер з датчиками Холла, щоб не перегружити двигун, і електровелосипед надійно працював запланований термін експлуатації.

Коли двигун перегрівається, захисна емаль, що оточує дроти статора, може розплавитися (рис. 1.5) [4]. Простіше кажучи, занадто тривалий підйом на низькій швидкості може перегріти двигун без теплового відкату, а його відсутність у велосипеді – це не те, про що виробники охоче розповідають (хоча нові електровелосипеди без теплового відкату, як правило, мають двигуни, які можуть витримувати більшу потужність, ніж заявлено виробником) [4]. Проте, в інтернеті є багато документації про перегрів двигунів

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

електровелосипедів [4]. Це лише одна з багатьох проблем, які можуть виникнути з двигуном [4].



Рисунок 1.5 - Поплавлена ізоляція і міжвиткове замикання [4]

Підключення контролера зображено на рисунку 1.6

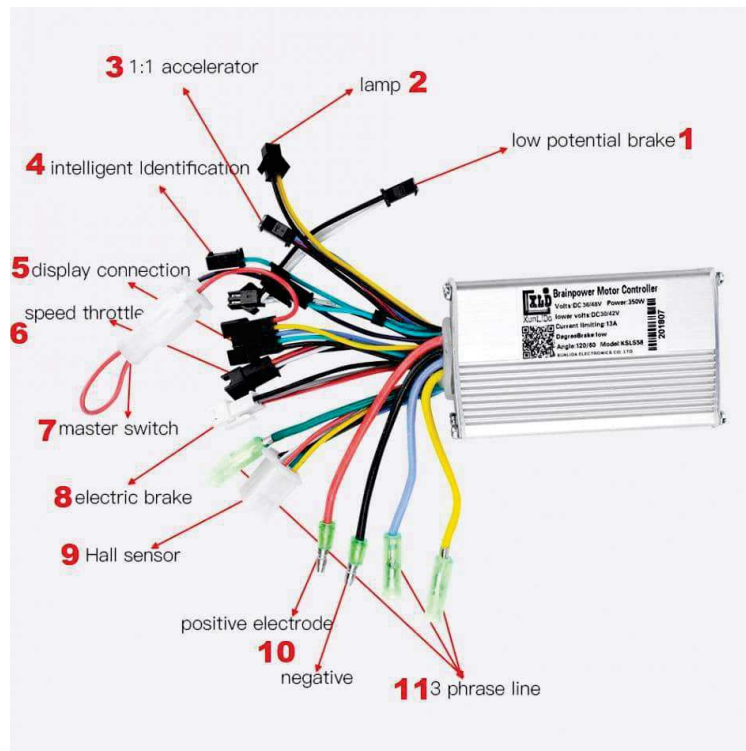


Рисунок 1.6 - Маркування вихідних роз'ємів синусного контролера для мотор-колеса [5]

										Арк.
										14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БРМА 25.00.00.000 ПЗ					

1) Подвійний роз'єм для ручки гальма. Має на увазі підключення спеціальної гальмівної ручки з відключенням живлення двигуна у разі гальмування. В основному ця ручка потрібна/обов'язкова, при використанні системи PAS або круїз-контроль, тому що в обох режимах мотор може працювати без прямої участі велосипедиста, отже, щоб мотор перестав працювати і дав можливість різко загальмувати – наявність такої ручки обов'язково у велосипеді [5].

2) Лампа. Можливість підключення світла від батареї. Під лампу відмінну від 36 вольт слід встановлювати перетворювач напруги [5].

3) Виведення під роботу системи PAS. Зазвичай червоний це +5v, чорний це земля (-), третій колір, який може бути на контролері це, безпосередньо, “сигнал” [5].

4) Інтелектуальне налаштування необхідно використовувати, якщо після підключення фазних проводів по кольору, привід не працює, слід зробити наступну операцію – з'єднати два зелені дроти. Включити живлення на екрані.

Якщо двигун крутиться у правильному напрямку – роз'єднати з'єднання із зелених проводів та відключити живлення. Якщо двигун не крутиться взагалі, натиснути на ручку газу до упору. І робити так, поки двигун не почне крутитися в потрібному напрямку. Після того, як почне роз'єднуєднати їх і відключити живлення [5].

5) Підключення дисплея LCD [5].

6) Ручка газу [5].

7) Майстер-ключ. До якого можна підключити “ключ запалювання” [5]

8) Електронне гальмо блокує двигун від руху, тим самим не даючи велосипеду їхати [5].

9) Роз'єм підключення датчиків Холла. У деяких моторах від мотора до контролера фазні дроти та проводи датчиків Холла йдуть одним круглим кабелем. Цей контролер розрахований під окреме підключення [5].

10) Живлення від батареї. Червоний, відповідно плюс, чорний – мінус [5].

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

11) Фазні дроти двигуна. Необхідно підключати за кольором, але якщо буде розбіжність, то необхідно користуватися режимом інтелектуального налаштування [5].

Електровелосипеди використовують датчики для визначення рівня допомоги педалей на основі даних, що вводяться водієм. Існують датчики швидкості, також відомі як датчики каденції, які надають електронну допомогу на основі частоти обертів педалей. Датчики доступні за ціною, не потребують особливого обслуговування і забезпечують розслаблений досвід їзди, який цінують багато велосипедистів [4]. Якщо необхідно їхати швидше, крутіть педалі швидше, а не сильніше. Таким чином, збільшити швидкість так само просто, як і збільшити частоту обертання педалей, незалежно від того, скільки зусиль ви докладаете. Датчики швидкості часто зустрічаються на електровелосипедах з приводом від втулки [4].

Датчики крутного моменту, навпаки, визначають належну величину крутного моменту двигуна, вимірюючи, який крутний момент ви прикладаєте до педалей (рис 1.7). Щоб їхати швидше, необхідно крутити педалі сильніше. Це більше схоже на їзду на традиційному велосипеді [4]. Датчики крутного моменту популярні на середньопривідних велосипедах, особливо на гірських велосипедах, тому що вони дають гонщикам більше контролю над застосуванням електронних допоміжних систем: Не потрібні тонни потужності одразу, при подоланні складної ділянки траси [4].

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16



Рисунок 1.7 - PAS датчик KT-V12L [4]

### 1.3 Типи акумуляторів для електровелосипедів

Електровелосипеду необхідно портативне джерело постійного струму, для цього використовують акумулятори. Зазвичай використовуються наступні типи акумуляторів:

- Найпоширеніший тип акумуляторів, який використовується у електроніці, комп'ютерній техніці, електротранспорті - Li-iOn акумулятори (рис.1.8) мають одні з найвищих показників енергоємності 110–200 Вт·год/кг, з робочою напругою — 3 – 4,2 В. Ресурс акумуляторів задовільний 500-800 циклів заряд - розряд.

Основним недоліком Li-iOn акумуляторів - це чутливість до заряду, і бояться перезаряду. При перевищенні напруги 4,2 В, літій починає кристалізуватися, пошкоджуючи ізоляцію, акумулятор загоряється. Тому обов'язково необхідно використовувати BMS.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17



Рисунок 1.8 – Li-ion акумулятор стандарту 18650

- Літій-залізо-фосфатні акумулятори (рис.1.9) мають багато переваг: великий термін служби (близко 2000 - 8000 циклів перезаряду), можливість працювання без втрати ємності при мінусових температурах, високий рівень безпеки (не загораються, як Li-ion), але є й ряд недоліків - це менша енергоємність 90 -158 Вт\*год/кг, номінальна напруга 3,2В, мінімальна 2В, максимальна 3,65В. Саморозряд на 3 - 5% за місяць



Рисунок 1.9 – Li FePo<sub>4</sub> акумулятор

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

## 1.4 Класифікація балансирів для акумулятора

Системи керування акумулятором (BMS) бувають різних типів, кожен з яких розроблений відповідно до конкретних застосувань і хімічного складу акумулятора [6]. Вибір типу BMS залежить від вимог і характеристик акумуляторної системи, якою він призначений керувати [6].

Пасивний BMS (рис 1.10) відстежує стан акумуляторної батареї, але не контролює активно процеси заряджання та розряджання [6]. Він надає дані про окремі комірки, але не балансує їх активно [6]. Він зазвичай використовується в програмах, де енергетичний баланс між осередками не є критичним, наприклад, невелика побутова електроніка, електроінструменти та деякі системи резервного живлення [6].



Рисунок 1.10 - Пасивний BMS

Активний BMS (рис.1.11) не тільки контролює акумуляторну батарею, але також активно керує зарядом і розрядом елементів [6]. Балансує елементи шляхом перерозподілу енергії [6].

						БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			19

Гібридний BMS поєднує в собі аспекти як пасивного, так і активного BMS [6]. Керує процесом заряджання та розряджання, пропонуючи більш точний збір даних [6].

Застосування знаходиться в програмах, де потрібен баланс між точністю та економічною ефективністю, наприклад, деякі рішення для зберігання енергії в житлових приміщеннях і невеликі промислові застосування [6].



Рисунок 1.11 - Активна BMS

Головні функції інтелектуальних BMS:

BMS моніторить напругу на кожному елементі, це забезпечує правильний заряд і розряд акумулятора, також BMS моніторить струм, і при перевищенні відключає. Важливо також відслідковувати температуру, адже акумулятори особливо Li-iOn чутливі до температури і при 60 градусів починають портитися.

Важливим параметром є відслідкування циклів заряд - розряд і зносу акумулятора.

Інтелектуальні BMS мають активне балансування з досить великим струмом від 0,4А до 5А.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

BMS мають Bluetooth, завдяки якому є можливість по додатку в телефоні моніторити в реальному часі всі параметри акумулятора.

JK BMS BD6A20S15P — Це найкраща система керування батареєю (рис. 1.12), розроблена для забезпечення виняткової продуктивності та надійності. Цей BMS спеціально розроблений для використання з літій-іонними та літій ферум фосфатними акумуляторами та здатний керувати від 8 до 24 елементами в послідовній конфігурації відповідно [7].



Рисунок 1.12 - Jikong BMS BD6A20S15P [7]

Завдяки розширеним функціям і можливостям Jikong BMS BD6A20S15P плата є ідеальним вибором для широкого спектру застосувань, включаючи електровелосипеди, квадрокоптери, системи сонячної енергії тощо. Вона має інтелектуальні функції балансування та моніторингу, які забезпечують оптимальну продуктивність і безпеку, а також надають дані в реальному часі про напругу, струм і температуру батареї (рис 1.13) [7].

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

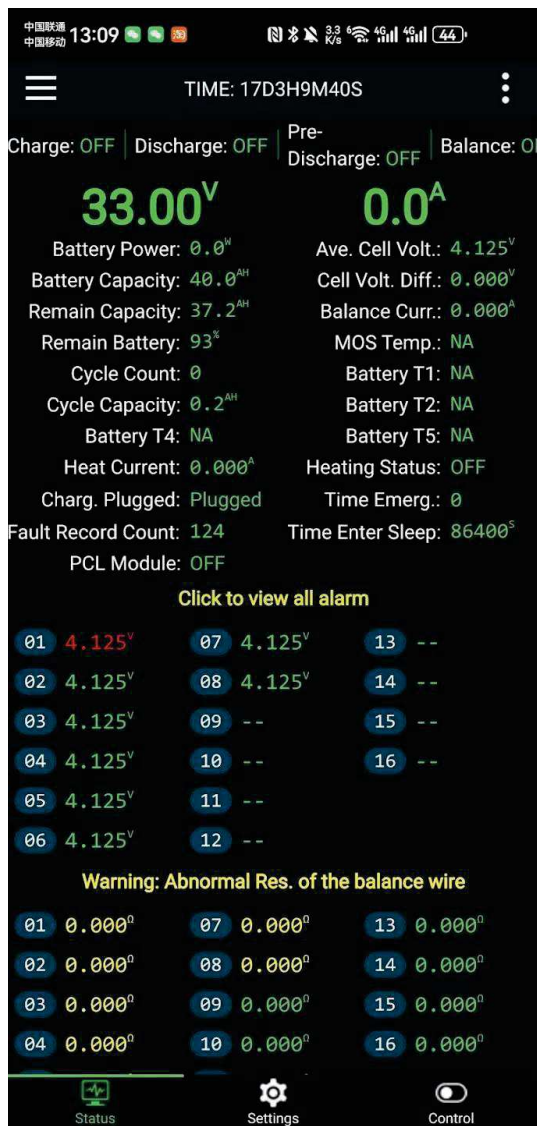


Рисунок 1.13 - Можливості BMS плати в додатку

BMS також створена для довговічності, має міцну та довговічну конструкцію, яка може витримувати навіть найсуворіші умови. BMS плата повністю програмована і може бути налаштована відповідно до ваших потреб, що робить її універсальним і надійним вибором для будь-якого проекту [7].

### 1.5 Висновки до першого розділу

У першому розділі курсового проекту, розроблено аналітичний огляд типів електровелосипедів, акумуляторів, а також електродвигунів, які встановлюються на електровелосипеди.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

- Електродвигуни для електровелосипедів бувають різними.

Найпопулярніші це редукторні мотор-колеса, їхні переваги в малій вазі, великому крутному моменті, малому споживанні, не гальмує велосипедиста при русі тільки на педалях. Недолік - полікарбонатіві шестерні, які можуть вийти з ладу.

Прямоприводне мотор-колесо не має шестерень, і тому його надійність в рази вища, обмежується тільки підшипниками, але електродвигун важкий, дорожчий, довше електровелосипед розганяється, при русі тільки на педалях мотор-колесо буде гальмувати, і їхати буде дуже важко. Такі мотор-колеса найефективніші при 0,95 номінальних обертів, тому що редукторні мотор-колеса ефективні при будь-яких обертах. Прямоприводні мотор-колеса встановлюються на електромопедах, на яких потрібно буде проїжджати великі відстані, і в гірському рельєфу.

Електродвигуни постійного струму, які включаються послідовно із зірочкою в ланцюг (середній привід). Вони мають перевагу в тому, що розміщені у центрі знизу велосипеда, і не змінюють центр маси, і тим самим велосипедом легше керувати. Недоліків вони мають багато, а саме: колекторний електродвигун постійного струму з щітками, які при активному використанні швидко зношуються і потребує заміни. Ланцюг і касета зірок у велосипеда швидко зношується і теж потребує заміни.

- Контролери за формою синусоїди діляться на синусні і з модифікованою синусоїдою. За функціоналом бувають без можливості підключення датчиків Холла, з можливістю підключення датчиків Холла, а також універсальні.

Універсальні розраховані на більш широкий діапазон напруг живлення, відповідно до підключеного електродвигуна, а також до них можна підключати, або не підключати датчі Холла.

- Акумулятори бувають різноманітні, але найбільшого застосування отримали Li-ion і LiPo4. Ці два типи акумуляторів за не дуже високу вартість мають високу енергоємність, великий термін служби Li-ion -800-1000 циклів, LiPo4 - 2000-8000 циклів. З цих двох типів акумуляторів безпечнішими є LiPo4,

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

вони можуть працювати при температурі до  $-30^{\circ}\text{C}$ , не дуже чутливі до заряду, дуже великий строк служби, при перезаряді чи пошкоджені не загоряються, екологічно чисті, але їх недолік порівняно з Li-ion - менша енергоемність при тій самій масі.

- Для захисту акумуляторів від перерозряду, перезаряду, коротких замикань використовуються плати BMS. Існують також інтелектуальні BMS, у яких всі параметри можна контролювати з додатка на телефоні, і за такими BMS майбутнє.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

## 2 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ ВЕЛОСИПЕДА

### 2.1 Вибір напрямку проектування і конструктивних рішень

Існує багато типів електродвигунів для велосипедів, але їхній основний недолік це спицювання в обід, велика вартість, можливість надколювання постійних магнітів, у редукторних мотор-колесах також обмежений термін служби зв'язаний з редуктором, у якому використовуються шестерні з полікарбонату.

З врахуванням цих всіх недоліків використовуватиму мотор-колесо від гіроскутера. Перевагою є надійність, тому що у нього немає елементів, які можуть швидко вийти з ладу, якщо його експлуатувати в номінальному режимі. Виключається можливість надколювання постійних магнітів, тому що двигун не заспицьований в колесо, а фрикційно передає крутний момент.

Із-за невисоких номінальних обертів, цей двигун найбільш енергоефективний. Найефективніше і водночас найпростіше це мотор-колесо закріпити так, щоб передача крутного моменту передавалася фрикційно. До рами двигун буде кріпитися через металеві пластини болтами (рис. 2.1), тим самим електропривід буде легко зняти з кріпленням при обслуговуванні велосипеда.



Рисунок 2.1 - Кріплення привода до рами велосипеда

						БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			25

При фрикційній передачі збільшується крутний момент, і зменшуються оберти на ведучому колесі велосипеда. Частота обертання двигуна 550 об/хв, діаметр 8 дюймів. Встановлений двигун на електровелосипед з діаметром коліс 26 дюймів.

Також ефективним рішенням буде розробити схему для динамічного гальмування електродвигуном. Таким чином при спуску з гори включатиму динамічне гальмування і генерована ЕРС стабілізована стабілізатором буде заряджати акумулятор, а також розгружати гальма на велосипеді.

Для реалізації рекуперативного гальмування потрібно змінну напругу випрямити трифазним діодним мостом, розрахувати необхідну ємність конденсаторів, а також стабілізувати напругу для стабільної зарядки акумулятора незалежно від обертів мотор-колеса.

Основною проблемою є закріплення мотор-колеса на велосипеді, тому що від цього залежить ефективність роботи.

## 2.2 Розробка варіантів структурних схем побудови пристрою та прийняття наряду його вирішення

Реалізація електроприводу може бути різною.

Встановити одне мотор-колесо на заднє колесо і керувати контролером за допомогою ручки газу, і цього буде достатньо для комфортного катання на велосипеді.

Поставити два мотор-колеса на переднє колесо і на заднє, тим самим збільшивши крутний момент, і велосипед зможе їхати незалежно від рельєфу на своїй максимальній швидкості. До нього підключити контролер, ручку газу, дисплей, щоб виводилася наявна швидкість, заряд акумулятора, пробіг, годинник, а також інтенсивність допомоги педалюванню, також підключити датчик гальмування, який не буде подавати напругу на мотор-колесо коли зажатий ричаг гальма.

Третій варіант з одним мотор-колесом взаді з контролером, ручкою газу,

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

дисплеєм.

### 2.2.1 Розробка структурної схеми побудови (варіант 1)

Перший варіант побудови електропривода для велосипеда зображений на рис. 2.2 і реалізований наступним чином. Мотор-колесо закріплено на задній вилці велосипеда і фрикційно передає крутний момент. Двигун має давачі Холла, для позиціонування двигуна в просторі. До контролера двигун підключається трьома фазними провідниками для живлення. З синхронного двигуна до контролера також підключаються чотири провідники давачів Холла [1]. Швидкість мотор-колеса регулюється через контролер ручкою газу.

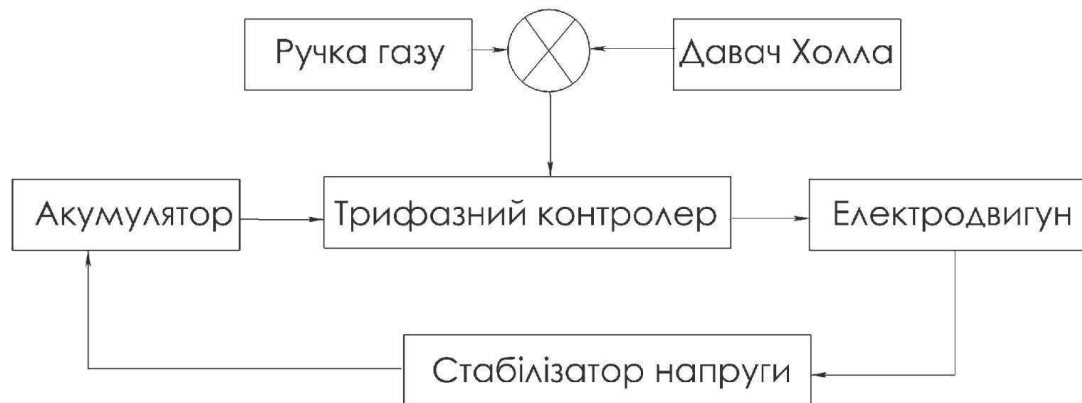


Рисунок 2.2 - Структурна схема до першого варіанту електропривода велосипеда

Контролер підключений до акумулятора номінальною напругою 36 В. Для рекуперації використовується стабілізатор напруги, який забезпечує стабільний заряд акумулятора при спуску велосипеда [1].

### 2.2.2 Розробка структурної схеми побудови (варіант 2)

Другий варіант побудови електропривода для велосипеда зображений на рисунку 2.3 і реалізований наступним чином. У цьому електроприводі

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

застосовуємо два мотор-колеса, на переднє і заднє колесо. Перевагою є великий крутний момент, завдяки якому є можливість їздити по горбистому рельєфу не зменшуючи максимальну швидкість. Але максимальна швидкість практично така сама, як у випадку з попереднім варіантом. Два мотор-колеса підключаються і керуються одним контролером, також до цього контролера підключаються датчі Холла. Контролер підключається до акумулятора. До контролера підключається велокомп'ютер з функцією асистування, на ньому також показується максимальна швидкість, яка визначається з датчів Холла, загальний пробіг, заряд акумулятора, теоретичний залишковий запас ходу, годинник. До контролера також підключається ручка газу, для регулювання обертів електродвигуна, датчик гальмування, який використовується для припинення живлення двигуна доки натиснете гальмо.

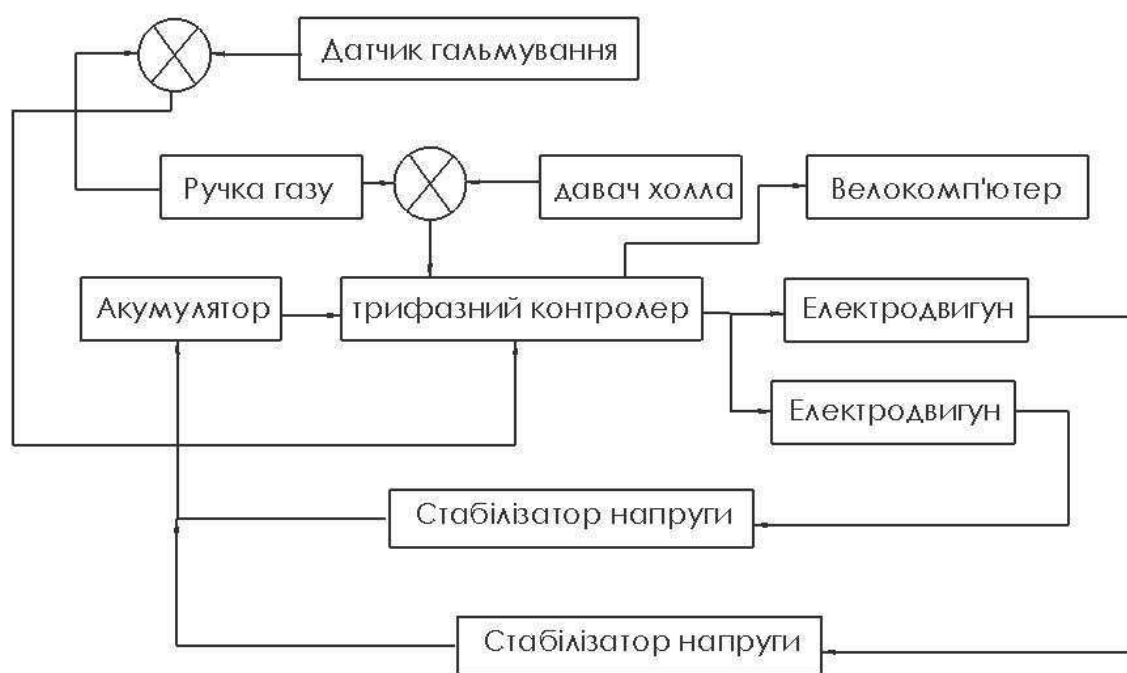


Рисунок 2.3 - Структурна схема до другого варіанту електропривода велосипеда

Опис структурної схеми:

Структурна схема (рис.2.3) працює наступним чином: Живлення електровелосипеда забезпечує акумулятор, розрахований на напругу 36 В і з ємністю 13,600 Ah. З акумулятора через захисну плату BMS, яка призначена

						БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			28

для балансування акумуляторних елементів, а також захист від перерозряду, коротких замикань, перегріву і т.д. напруга подається на контролер, який виконує багато функцій, головна - це керування синхронними двигунами. З двигунів до контролера підключені датчі Холла, які відслідковують положення двигуна в просторі, частоту обертання. З датчів Холла також визначається швидкість велосипеда, яка виводиться на велокомп'ютер.

Керування швидкістю обертання забезпечує ручка газу, і датчі Холла, сигнал між якими порівнюється, і подається контролеру. З контролера також виходять інформаційні виходи на велокомп'ютер, а саме вихід для показу напруги, сигнали датчиків Холла, струм споживання з акумулятора.

### 2.2.3 Розробка структурної схеми побудови (варіант 3)

Структурна схема зображена на рис. 2.4 і працює наступним чином: живлення електровелосипеда забезпечує акумулятор, розрахований на напругу 36 В і ємністю 13,600 Ah.

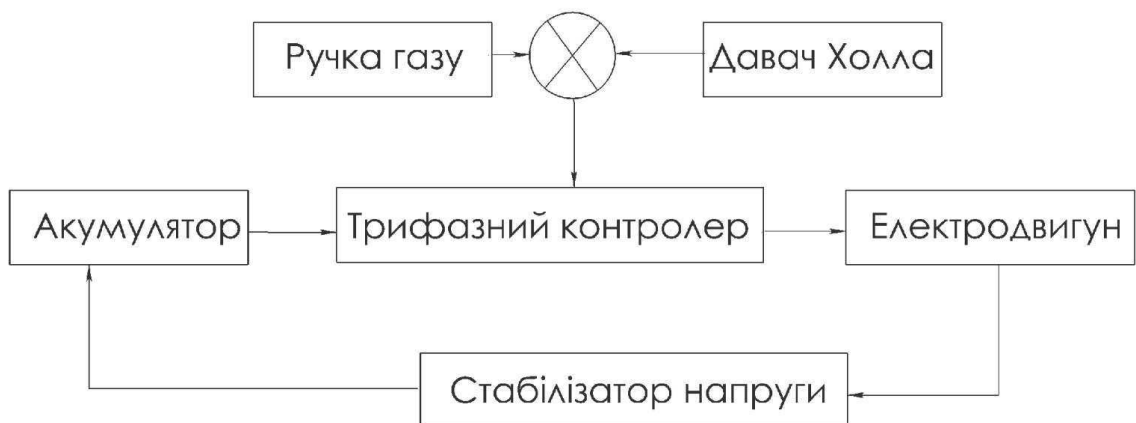


Рисунок 2.4 - Структурна схема до першого варіанту електропривода велосипеда

З акумулятора через захисну плату BMS, яка призначена для балансування акумуляторних елементів, а також захист від перерозряду, коротких замикань, перегріву і т.д. напруга подається на контролер, який

виконує багато функцій, головна - це керування синхронним двигуном. З двигуна до контролера підключені датчики Холла, які відслідковують положення двигуна в просторі, частоту обертання. З датчиків Холла також визначається швидкість велосипеда, яка виводиться на велокомп'ютер. Керування швидкістю обертання забезпечує ручка газу, і датчики Холла, сигнал між якими порівнюється і подається контролеру. З контролера також виходять інформаційні виходи на велокомп'ютер, а саме вихід для показу напруги, сигнали датчиків Холла, струм споживання з акумулятора.

Вибрано найоптимальніший варіант перший.

### 2.3 Розробка електроприводу

Кріплення мотор-колеса до рами велосипеда (аркуш [БРМА 25.03.00.000 СК] ) представлено на рисунку 2.5. До задньої вилки велосипеда притискаються дві пластини 1 болтами (М6) 14, і гайками 15. Під кутом 60 градусів приварена квадратна труба 2 25x25x2, яка з трубою 3 і кутником 20x20x3 4 складає зварне з'єднання. Кріпильна конструкція дозволяє закріплювати різні гіроскутерні колеса з діаметром від 6,5 до 10,5 дюймів, ця можливість реалізується зміною кута профіля 5, який може підніматися і опускатися завдяки болту 16. Завдяки цьому, якщо акумулятор розрядився, то є можливість послабити болт 11, підняти кутник 5 у положення таке, щоб колесо не торкалося велосипедного, і таким чином при їзді тільки на педалях двигун не створює додатковий опір, цим було вирішено основний недолік прямоприводних двигунів [1]. Завдяки передачі крутного моменту фрикційно постійні магніти не будуть сколюватися при їзді на велосипеді на нерівній дорозі, і тим самим збільшується строк служби двигуна. Для закріплення вала мотор-колеса зроблене кріплення: до кутника приварені пластини 6, товщиною 5мм, у яких були зроблені отвори і нарізана різьба М8. Зверху накладається пластина 8 і притискається болтами 9 [1].

Прямокутні труби 2, 3, 4 і кутник 5 і пластини 1 виготовлені із

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

конструкційної сталі 45.

Пластина 6 виготовлена з алюмінію Д16Т.

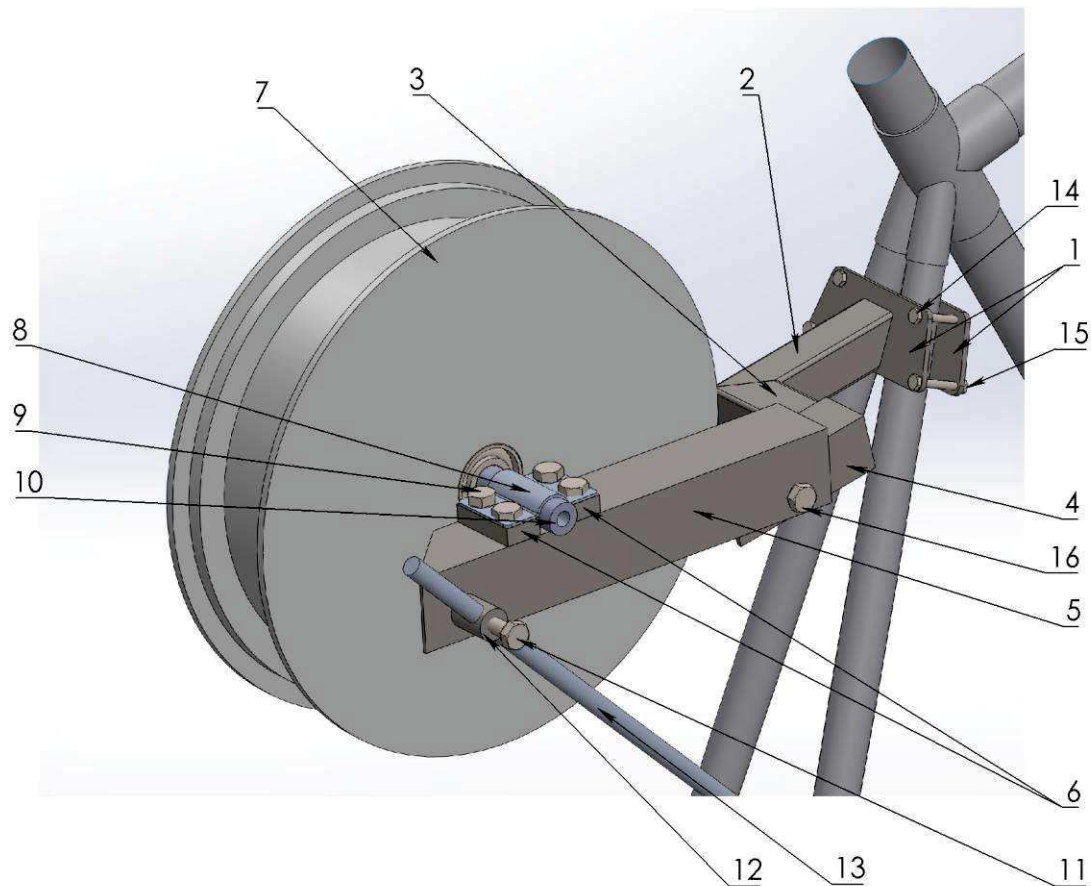


Рисунок 2.5 - Конструкція електропривода

Для прямокутних труб і кутників була застосована термообробка - нормалізація.

2.4 Розробка стабілізатора напруги для заряду акумуляторів в режимі динамічного гальмування

Стабілізатор напруги (рис. 2.6) складається з наступних компонентів:

- резистори R1, R4, R9 - 1кОм; R2 - 100кОм; R3 - 5 кОм; R6, R5 - 8.2кОм; R7 - 4.7 Ом;
- ШІМ контролер - UC3843;

									Арк.
									31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БРМА 25.00.00.000 ПЗ				

- польвий транзистор - n-канальний, IRFZ44N;
- запобіжник FU1 - 10А струм спрацювання;
- конденсатори C1, C2, C10, C11 - 50В, 1000мкФ;
- конденсатори C3, C12, C6 - 100нФ;
- конденсатор C5 - 2,2нФ;
- конденсатор C4 - 220пФ;
- конденсатор C7 - 330пФ;
- дросель - L= 10mH;
- діодна збірка D1 MBR10100 - струм 20А;

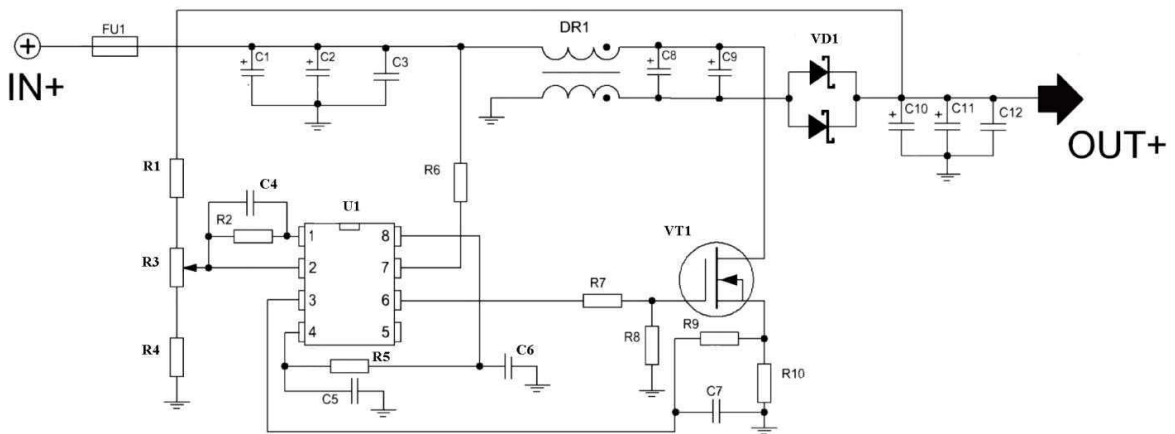


Рисунок 2.6 - Електрична схема стабілізатора напруги

Електрична схема представлена на рис. 2.6 (аркуш[БРМА 25.03.00.000 ЕЗ] ) призначена для стабілізації напруги на виході. Незалежно від того яка напруга буде подаватися на вхід від 10 до 60 вольт, на виході буде видавати задану стабільну напругу. Вихідна напруга задається резистором R3, який представляє разом з резистором R1 і R4 ділянку напруги, обертаючи змінний резистор R3 змінюється величина напруги, яка подається на вхід 2 компаратора, який вбудований в мікросхему ШІМ регулятора.

Стабілізатор має захист від перевантаження і коротких замикань, який реалізований наступним чином. В якості давача струму резистор R10 - це

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

низькоомний шунт, чим більший його опір, тим менший струм спрацювання захисту і навпаки.

Вхідна напруга стабілізатора проходить через запобіжник FU1, а потім згладжується конденсаторами C1, C2, C3. І поступає на дросель. Живлення мікросхеми відбувається від вхідної напруги, через струмообмежуючий резистор R6.

Стабілізація вихідної напруги працює наступним чином: компаратор в ШІМ регуляторі порівнює задану величину напруги з дільника R1, R3, R4, і напругу з вихода, ШІМ генерує необхідні імпульси на вихід б, до якого через струмообмежуючий резистор R7, підключений затвор польового транзистора VT1. На рис. 2.7, зображена осцилограма на затворі польового транзистора, без навантаження. Як видно імпульси вузькі, і транзистор більшу частину часу закритий. На рис. 2.8 зображено осцилограму при струмі 2,5А, заповнення 40%. У цьому випадку транзистор більшу частину часу відкритий, і дросель накопичує більше енергії.

Транзистор VT1 має n-провідність, а це означає, щоб його відкрити потрібно на затвор подати позитивний імпульс, бажано, щоб він був прямокутний, щоб ключ не працював в лінійному режимі. При подачі позитивного імпульсу на транзистор VT1, він відкривається і дросель починає накопичувати енергію, коли транзистор закривається дросель віддає енергію, і цикл повторюється. В залежності від того як довго транзистор відкритий, буде відповідно змінюватися вихідна напруга. Після дроселя напруга випрямляється діодом VD1 і згладжується конденсаторами C10, C11, C12.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

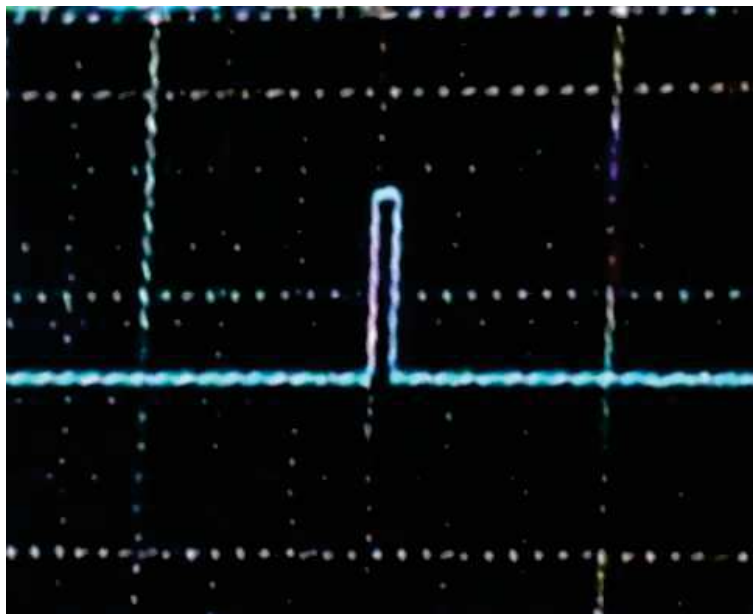


Рисунок 2.7 - Прямокутний сигнал на затворі транзистора без навантаження

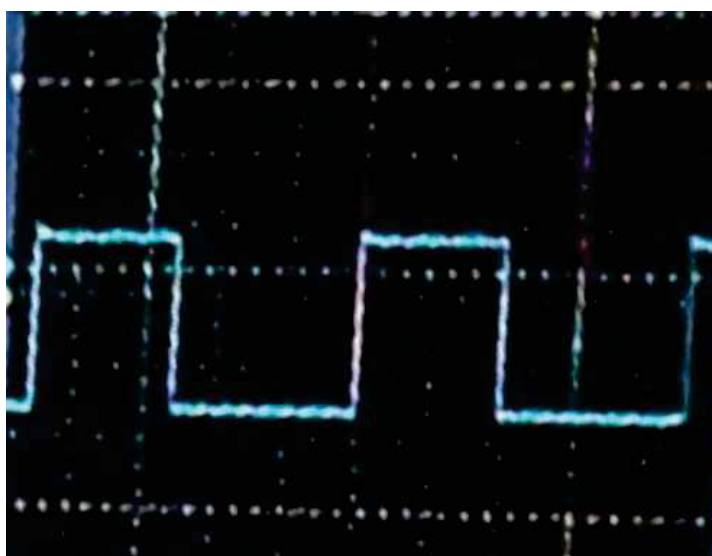


Рисунок 2.8 - Прямокутний сигнал на затворі транзистора з навантаженням 2,5А

Основним компонентом для розрахунку є імпульсний трансформатор. Від точності розрахунку залежать параметри та характеристики такі як ККД, габаритні розміри, вага та надійність.

### 2.5 Висновки до другого розділу:

У другому розділі розроблено три варіанти реалізації електропривода для велосипеда, їх переваги і недоліки наступні:

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Найоптимальніший варіант електропривода - перший. Він складається з контролера, ручки газу, акумулятора, стабілізатора, і цього достатньо для комфортної їзди на велосипеді. В інших варіантів з велокомп'ютерами набагато більша ціна, але функціоналом велокомп'ютера, наприклад асистування педалюванню зазвичай не користуються, а їздять виключно на тязі мотор-колеса.

Другий варіант найкраще підходить для поїздки по горбистому рельєфі, на ньому встановлюється два мотор-колеса, і тому крутний момент в два рази більший. Основний недолік, при розрядженому акумуляторі великий опір педалюванню, дорожча конструкція, складніше встановити, акумулятор розряджається швидше, тому такий електропривід не раціонально використовувати в місті.

Третій варіант електропривода має одне мотор-колесо, контролер, але крім того ще велокомп'ютер. Велокомп'ютер коштує багато, а у нього основний функціонал - це Pass asistant, який допомагає педалюванню, але ним дуже рідко хто користується, у електроприводах потужністю до 350 Вт і тому у б'юджетних електровелосипедах застосовувати велокомп'ютер нераціонально.

Розроблено в програмі SolidWorks електропривід, який буде поєднувати переваги прямоприводного мотор-колеса, а саме високу надійність обмежену лише підшипниковим вузлом, а також редукторного мотор-колеса - це вільний хід при їзді тільки на педалях. Ця можливість реалізується підняттям колеса, щоб не було фрикційного контакту з велосипедним колесом при їзді тільки на педалях.

Розроблено стабілізатор напруги, який буде заряджати акумулятор при їзді тільки на педалях.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

### 3 РОЗРАХУНКИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ КОНСТРУКЦІЇ ЕЛЕКТРОВЕЛОСИПЕДА

#### 3.1 Розрахунок ємності акумулятора.

Для акумулятора електровелосипеда використовуватиму Li-ion акумулятор стандарту 18650. Один елемент акумулятора має номінальну напругу 3,6 В і ємність 3400 mAh. Акумулятор для електровелосипеда потрібно зробити на напругу 36 вольт. Щоб розрахувати необхідну кількість послідовних елементів скористаємось формулою 3.1.

Розраховуємо кількість послідовних елементів:

$$N_s = \frac{U_3}{U_{e1}}, \quad (3.1)$$

$U_3$  - напруга зібраного акумулятора для велосипеда;

$U_{e1}$  - напруга одного елемента акумулятора.

$$N_s = \frac{36}{3.6} = 10,$$

Для збільшення ємності акумулятори включаються паралельно.

$$N_2 = N_s \times N_e, \quad (3.2)$$

$N_s$  - кількість з'єднаних послідовно акумуляторів;

$N_e$  - кількість з'єднаних паралельно акумуляторів;

$N_2$  - кількість акумуляторів.

$$N_2 = 10 \cdot 4 = 40$$

Таким чином розраховано акумуляторну збірку 10S4p.

Ємність акумуляторів 3400 mAh, Паралельно з'єднані 4 акумулятори, тому ємність дорівнює:

$$C_b = N_e \times C_1 \text{ mAh}, \quad (3.3)$$

$C_b$  - ємність збірного акумулятора;

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$C_1$  - Ємність одного елемента.

$$C_b = 4 \cdot 3400 = 13600 \text{ mAh}$$

### 3.2 Розрахунок потужності моторколеса

Вихідні дані для розрахунку:

Маса електровелосипеда  $m_{ев} = 20$  кг.

Середня маса водія  $m_в = 70$  кг.

Середня маса вантажу  $m_{вт} = 10$  кг

Діаметр колеса велосипеда  $D_k = 26$  дюймів.

При розрахуванні необхідної потужності електродвигуна необхідно визначити складові навантаження. Статичний момент - перша складова, який створюється гальмуючими силами. Які знаходять за формулою 3.4.

$$F = F_{тр} + F_{оп}, \quad (3.4)$$

де  $F_{тр}$  – сила тертя гуми об асфальт,

$F_{оп}$  – сила опору повітря [8].

Сила опору тертя знаходиться за допомогою формули [8]:

$$F_{тр} = \mu \cdot m \cdot g \text{ Н}, \quad (3.5)$$

де  $\mu$  - 0,0035 – коефіцієнт тертя при взаємодії резини з асфальтом [8];

$g$  - 9,8 м/с – прискорення вільного падіння [8];

$m$  – повна маса електровелосипеда з вантажем і водієм [8]:

$$F_{тр} = 0,0035 \cdot 110 \cdot 9,81 = 4 \text{ Н}$$

$$m = m_{ев} + m_в + m_{вт} \text{ кг}. \quad (3.6)$$

$$m = 20 + 80 + 10 = 110 \text{ кг}$$

Силу опору повітря знаходимо за формулою 3.7 [9]:

$$F_{оп} = C_x \cdot S \cdot \rho \cdot \left( \frac{v^2}{2} \right) \text{ Н}, \quad (3.7)$$

де  $C_x$  - 1,1 – коефіцієнт обтічності [9].

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

$$F_{\text{оп}} = 1,1 \cdot 0,63 \cdot 1,29 \cdot \left( \frac{7^2}{2} \right) = 22 \text{ Н},$$

S – лобова площа, визначається за формулою 3.8 [9]:

$$S = 0,5 \cdot h \cdot w \text{ м}^2, \quad (3.8)$$

де h - 1,8 м та w 0,7 м – середня висота і ширина посадки водія на транспортному засобі відповідно (рис. 3.1);

1,29 кг/м<sup>3</sup> – густина повітря[9];

V=4, м/с – середня швидкість руху електровелосипеда [9].

$$S = 0,5 \cdot 1,8 \cdot 0,7 = 0,63 \text{ м}^2.$$

Експериментально визначається коефіцієнт обтічності способом обдування у аеродинамічній трубці моделі [8]. Так як проводиться розрахунок в етапі розробки, при врахуванні значення даного коефіцієнта вже для наявних велосипедів, тому цей коефіцієнт вибраний приблизно[8]. Таким чином, розраховуючи коефіцієнта враховано високу посадку, а також конструктивні особливості велосипеда, було прийнято рішення значення коефіцієнта рівним  $C_x = 1,1$  [8].

Найбільший аеродинамічний опір діє в напрямку, який протилежний руху електровелосипеда, тому площу лобової поверхні знаходимо так, як показано на рис. 3.1.

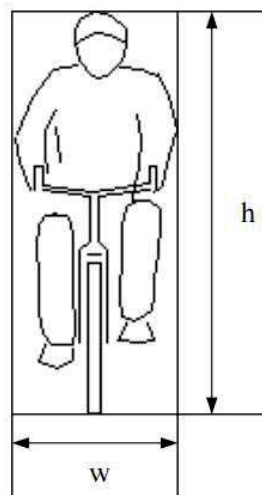


Рисунок 3.1 – Визначення лобової площі електровелосипеда [10]

Радіус колеса в метрах знаходимо згідно з формулою 3.9 [8].

$$R_k = \frac{D_k}{2 \cdot d} M, \quad (3.9)$$

де  $d$  – коефіцієнт приведення дюймів до метру [9].

$$R_k = \frac{26}{2 \cdot 39,4} = 0,33 \text{ м.}$$

Відповідно до (3.7), радіус приведення буде [9]:

$$r = \frac{0,33}{3} = 0,11. \quad (3.10)$$

Тепер знаходимо статичний момент навантаження [9]:

$$M_{ст} = \frac{F_T \cdot r}{\eta_m} \text{ Нм} \quad (3.11)$$

$$M_{ст} = \frac{26 \cdot 0,11}{0,8} = 3,6 \text{ Нм,}$$

де  $\eta$  - 0,8 – середнє значення ККД всього механізму.

Слід врахувати, що отриманого значення потужності електродвигуна вистачить тільки для того, щоб долати сили опору руху при звичайних погодних умовах на рівній поверхні [9]. Врахуємо також зусилля для руху вгору по похилій площині і складні погодні умови, такі як сильний вітер, та збільшимо розрахункове значення статичного моменту у два рази [9].

$$M'_{ст} = 2 \cdot M_{ст} \text{ Нм} \quad (3.12)$$

$$M'_{ст} = 2 \cdot 3,6 = 7,2 \text{ Нм.}$$

Друга складова, яку потрібно врахувати, це динамічний момент навантаження, оскільки електровелосипед є досить інерційним механізмом. Для безпечного руху водія, розрахуємо лінійне прискорення таким чином [9]:

$$a = \frac{2S}{t^2} \quad (3.13)$$

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

У формулі (3.13) вважаємо, що електровелосипед з початку руху проїжджає 100 метрів за 18 секунд. Це комфортний розгін транспортного засобу на дорозі [9].

$$a = \frac{2 \cdot 100}{18^2} = 0.61 \frac{м}{с^2}.$$

Тоді, кутове прискорення дорівнюватиме [9]:

$$\varepsilon = \frac{a \text{ рад}}{r \text{ с}^2}. \quad (3.14)$$

$$\varepsilon = \frac{0.61}{0.11} = 5.54 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$$

Динамічний момент знаходимо за наступною формулою [9]:

$$M_{дн} = J'_B \varepsilon \text{ Нм}, \quad (3.15)$$

де  $J'_B$  – приведений до валу двигуна момент інерції електровелосипеда, що знаходиться за формулою [9]:

$$J'_B = m \cdot r^2 \quad (3.16)$$

$$M_{дн} = J'_B \varepsilon = 1,3 \cdot 5,54 = 7,2 \text{ Нм}.$$

Повний момент двигуна при розгоні дорівнює [9]:

$$M = M_{ст} + M_{дн} \text{ Нм}, \quad (3.17)$$

$$M = 7.2 + 7.2 = 14.4 \text{ Нм}.$$

Електродвигун має номінальний момент 8 НМ, але максимальний момент більший, тому мотор-колесо для гіроскутера цілком підходить для електровелосипеда, щоб стабільно розганятися, підтримувати задану швидкість, а також виїжджати на підвищення.

Розрахунок передаточного співвідношення [10].

$$u = \frac{26}{8} = 3,25. \quad (3.18)$$

Розрахунки моменту [9].

$$T_2 = \frac{9550 \cdot P_2}{n} \text{ Нм}. \quad (3.19)$$

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

$$T_2 = \frac{9550 \cdot 0.2}{550} = 3.47 \text{ Нм.}$$

Розрахунок моменту на колесі електровелосипеда.

$$M_{2e} = u \cdot M_2 \text{ Нм.} \quad (3.20)$$

$$M_{2e} = 3.25 \cdot 3.25 = 10.56 \text{ Нм.}$$

При цьому максимальна теоретична швидкість велосипеда дорівнює  
Перетворити метри в кілометри на годину:

$$V_1 = \frac{v \cdot 60}{1000} \frac{\text{км}}{\text{год}}. \quad (3.21)$$

$V_1$  - Це максимальна швидкість електровелосипеда без навантаження.

$$V_1 = \frac{462.02 \cdot 60}{1000} = 27.72 \frac{\text{км}}{\text{год}}.$$

При реальних умовах експлуатації максимальна швидкість буде меншою.

### 3.3 Розрахунок електропривода в SolidWorks Simulation

Для проведення розрахунків на міцність використовується метод аналізу скінченних елементів (МСЕ), який реалізований у багатьох програмних системах автоматизованого проектування, зокрема в інженерному програмному забезпеченні SOLIDWORKS Simulation [13].

Ідея методу скінченних елементів полягає в тому, що тривимірна твердотільна модель деталей, вузлів або конструкцій розбивається на сітку скінченних елементів, після чого формуються матриці жорсткості, а потім обчислюються значення напружень та переміщень у всіх вузлових точках скінченних елементів [13]. Під час створення розрахункової моделі слід враховувати, що в SOLIDWORKS Simulation можна використовувати кілька типів скінченних елементів, таких як: 1) об'ємні тетраедри (для твердотільних моделей); 2) балкові елементи – для елементів зварних металевих конструкцій (швелер, прямокутні труби тощо); 3) тонкостінні елементи (зокрема, для

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

деталей з листового металу) [13]. У розробленій тривимірній моделі були використані всі зазначені типи скінченних елементів: балкові елементи для кутника і прямокутних труб; оболонкові елементи для металевих листів, а також скінченні елементи у вигляді тривимірних тетраедрів для об'ємних деталей [13].

Для визначення, який максимальний крутний момент може витримати привід, а також задні трубки велосипеда, привід було розраховано в SolidWorks Simulation [14].



Рисунок 3.2 - Привід електровелосипеда

Створено статичне дослідження і задано матеріали: Прямокутна труба і кутник з сталі СТ 3 (рис. 3.3), Рама з Alloy 6061, матеріал мотор-колеса-пластик ABS.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Property	Value	Units
Elastic Modulus	1.94e+11	N/m <sup>2</sup>
Poisson's Ratio	0.29	N/A
Shear Modulus	7.5e+10	N/m <sup>2</sup>
Mass Density	7800	kg/m <sup>3</sup>
Tensile Strength	517017000	N/m <sup>2</sup>
Compressive Strength		N/m <sup>2</sup>
Yield Strength	206807000	N/m <sup>2</sup>
Thermal Expansion Coefficient	1.8e-05	/K
Thermal Conductivity	16	W/(m·K)
Specific Heat	500	J/(kg·K)

Рисунок 3.3 - Властивості сталі Ст 3

Наступним кроком необхідно визначити тип скінченних елементів, прямокутні труби 25x25x2, і кутники 40x40x2 необхідно вибрати опцію Treat as beam, пластини представляємо як Treat as solid і листовий метал відповідно Treat as sheet metal [15].

Після визначення типу скінченних елементів необхідно визначити закріплення (рис 3.4) [16].

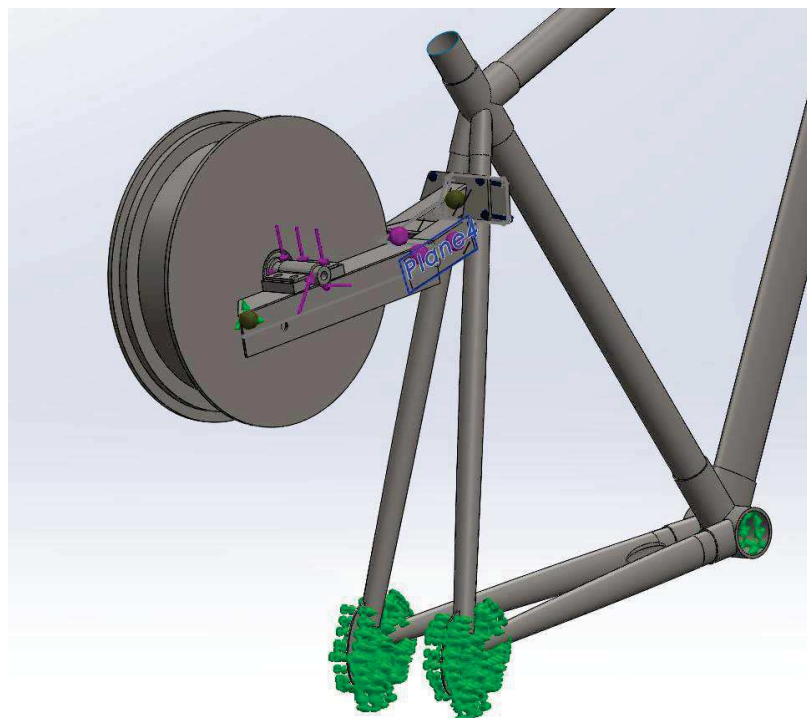


Рисунок 3.4 - Закріплення рами велосипеда

Наступним кроком задано крутний момент 3,25 Нм (аркуш [БРМА 25.03.00.000 ДД] ).

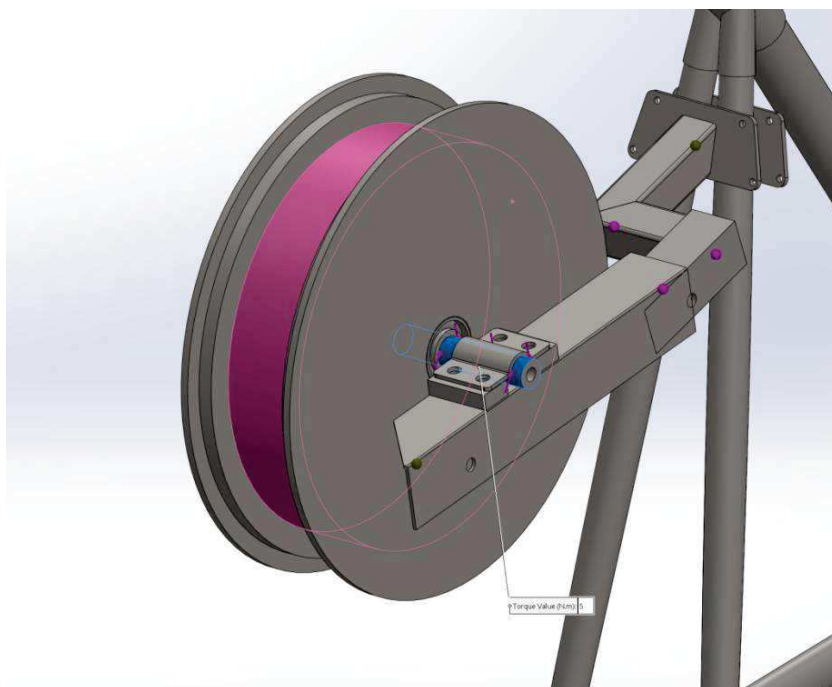


Рисунок 3.5 - Задання крутного моменту

Дальше необхідно додати болти М6 (рис. 3.6).

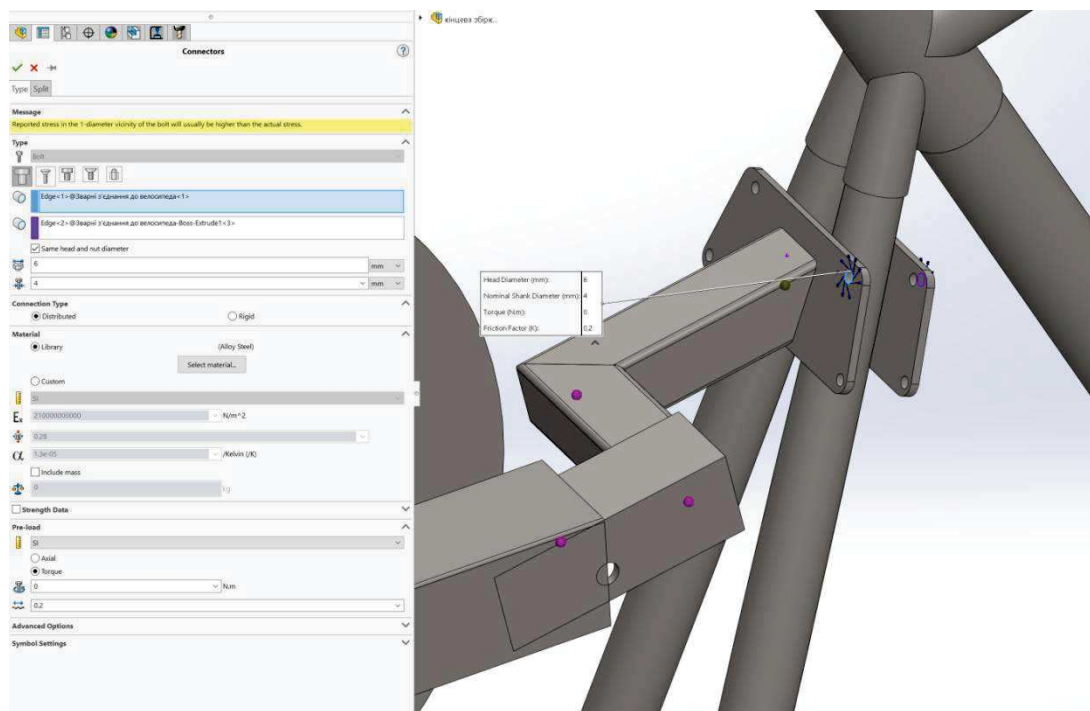


Рисунок 3.6 - Додавання болтових з'єднань

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Для правильного сприйняття необхідно вручну встановити контакт між пластинами і задньою частиною рами велосипеда (рис.3.7, рис.3.8) [17].

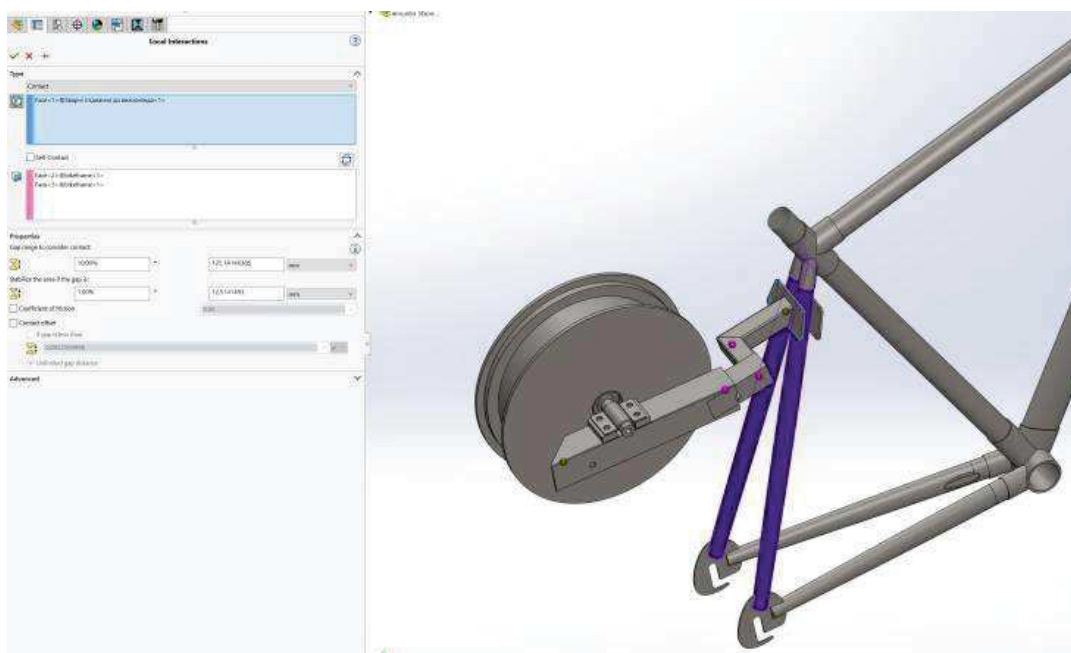


Рисунок 3.7 - Визначення контакту між пластинами і задніми трубками велосипеда

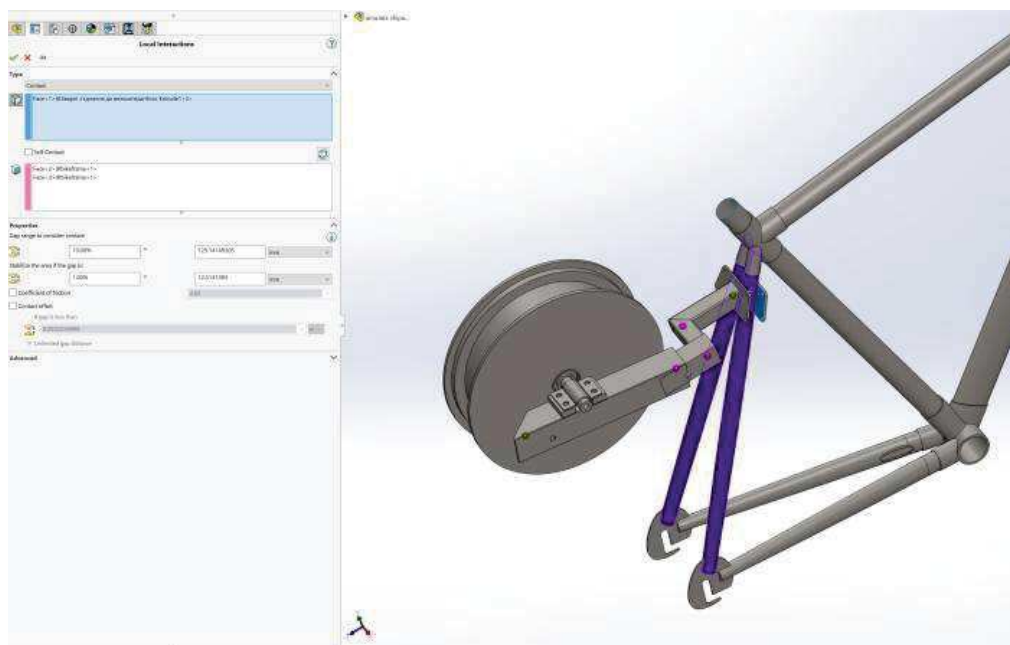


Рисунок 3.8 - Визначення контакту між пластинами і задніми трубками велосипеда

Наступним важливим кроком є правильно задати умови з'єднання

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

кутника з пластинами [18]. В реальності пластини приварені до кутника, і тому необхідно використати тип Bonded, першого вибрати кутника, як балочна конструкція, а другою - дотична до кутника сторона пластини (рис 3.9) [19].

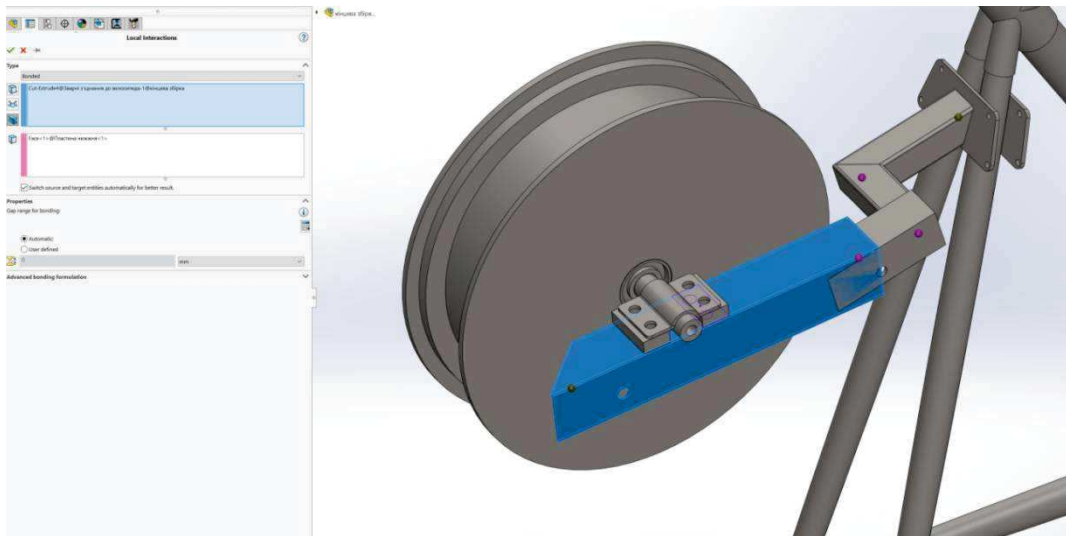


Рисунок 3.9 - Визначення контакту між кутником і пластиною

Наступним кроком є визначення контакту між верхньою пластиною (рис 3.10)

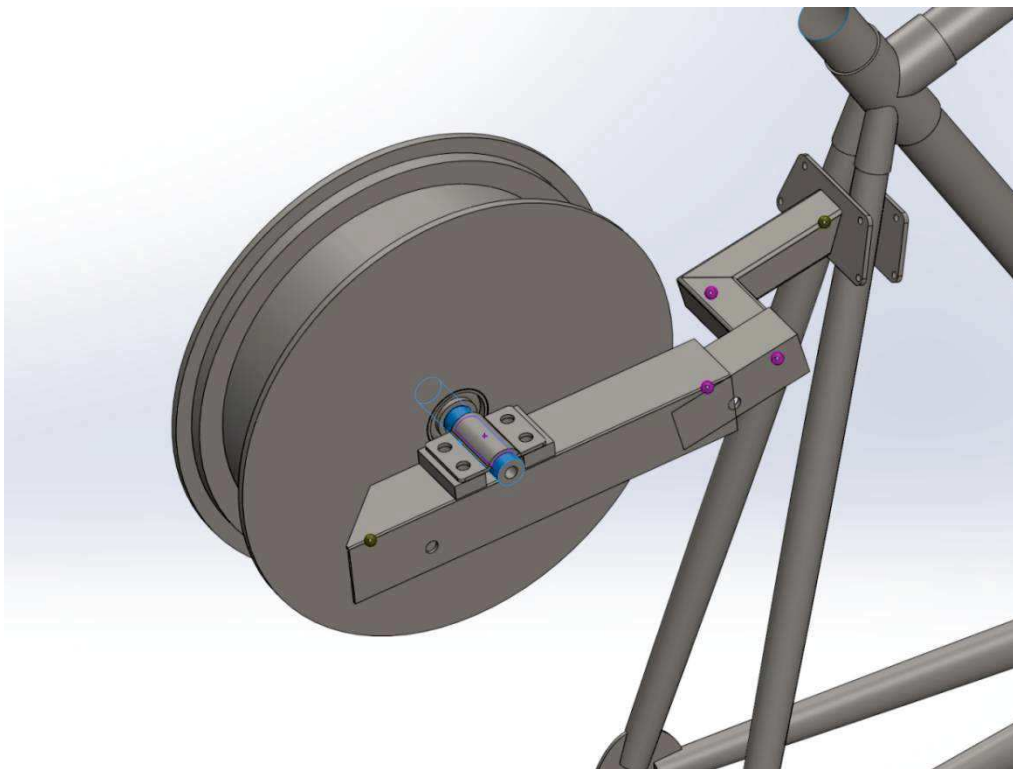


Рисунок 3.10 - Визначення контакту між валом і пластиною

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

46

Дальше необхідно визначити товщину рамки, для цього відкриваємо команду Shell Definition і вибираємо опцію Thin, де задаємо товщину всіх трубок 1мм (рис 3.11).



Рисунок 3.11 - Визначення товщини рами

Необхідно визначити товщину пластини, яка притискає вал мотор-колеса (рис 3.12).

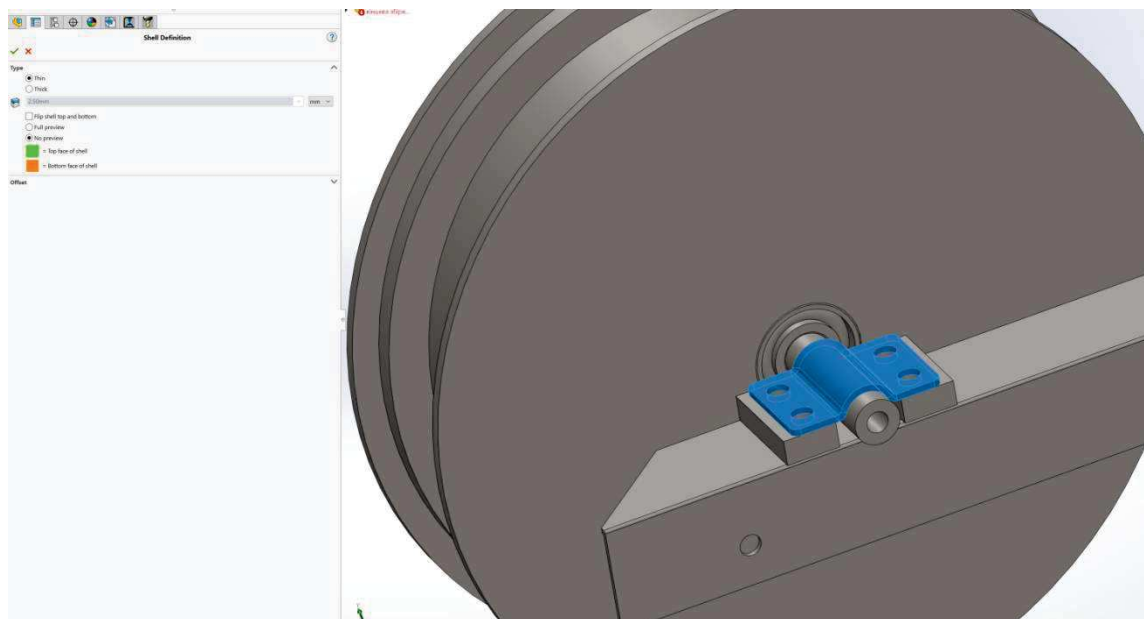


Рисунок 3.12 - Визначення товщини пластини

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		47

Наступним кроком є створення сітки (рис 3.13).



Рисунок 3.13 - Створена сітка

Для високої точності розрахунку, а також для економії ресурсів комп'ютера було створено адаптивну сітку, яка густіша в тих місцях де найбільше напруження (рис.3.14).

Після створення сітки було запущене дослідження, і виявилось, що найслабше місце в конструкції привода - це місце приварення пластини до кутника (рис 3.15). Мінімальний запас міцності отримано 7,511 (рис 3.15).

Отже привід має великий потенціал, тому що на нього можна встановити моторколесо значно потужніше.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

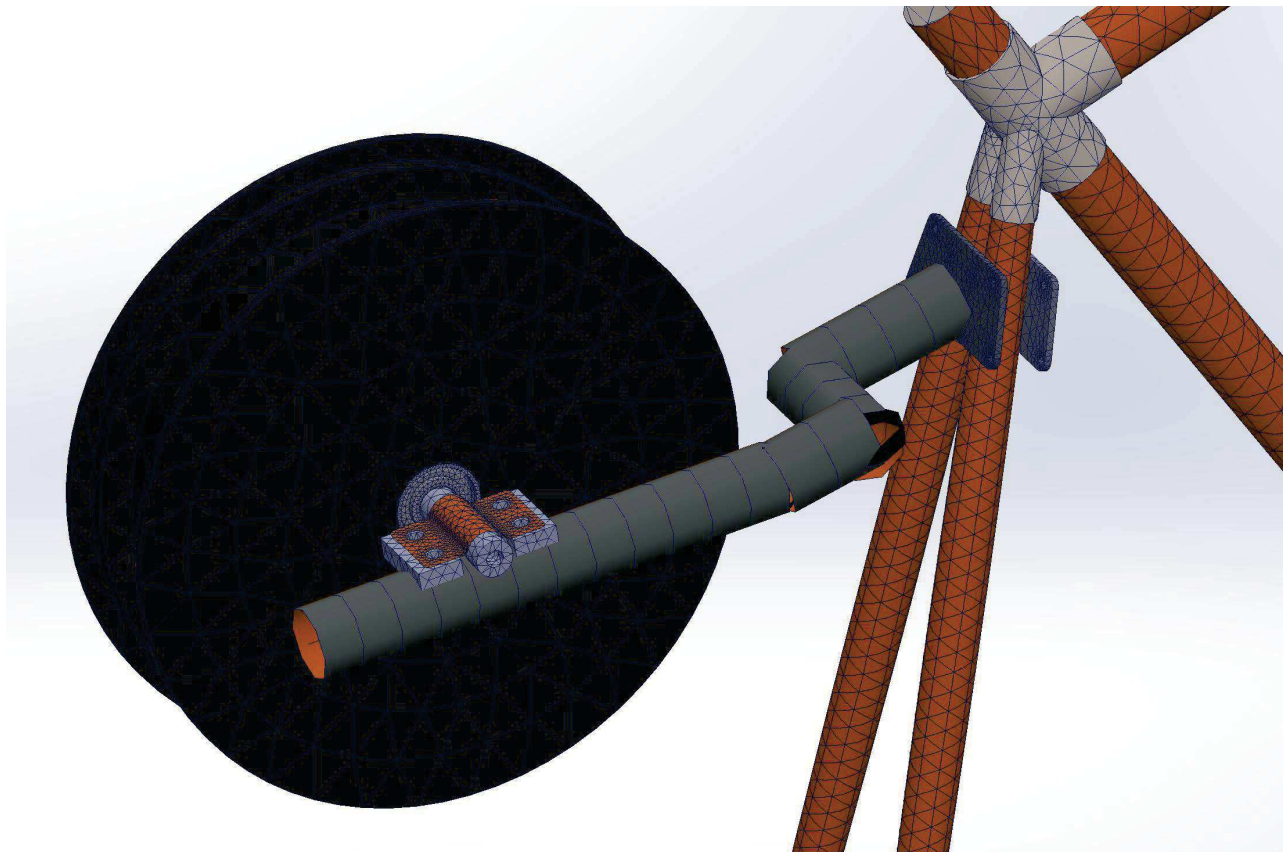


Рисунок 3.14 - Створена адаптивна сітка

Model name: кінцева збірка  
 Study name: Static 5(-Для розрахунку 1-)  
 Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1  
 Criterion : Automatic  
 Red < FOS = 25 < Blue

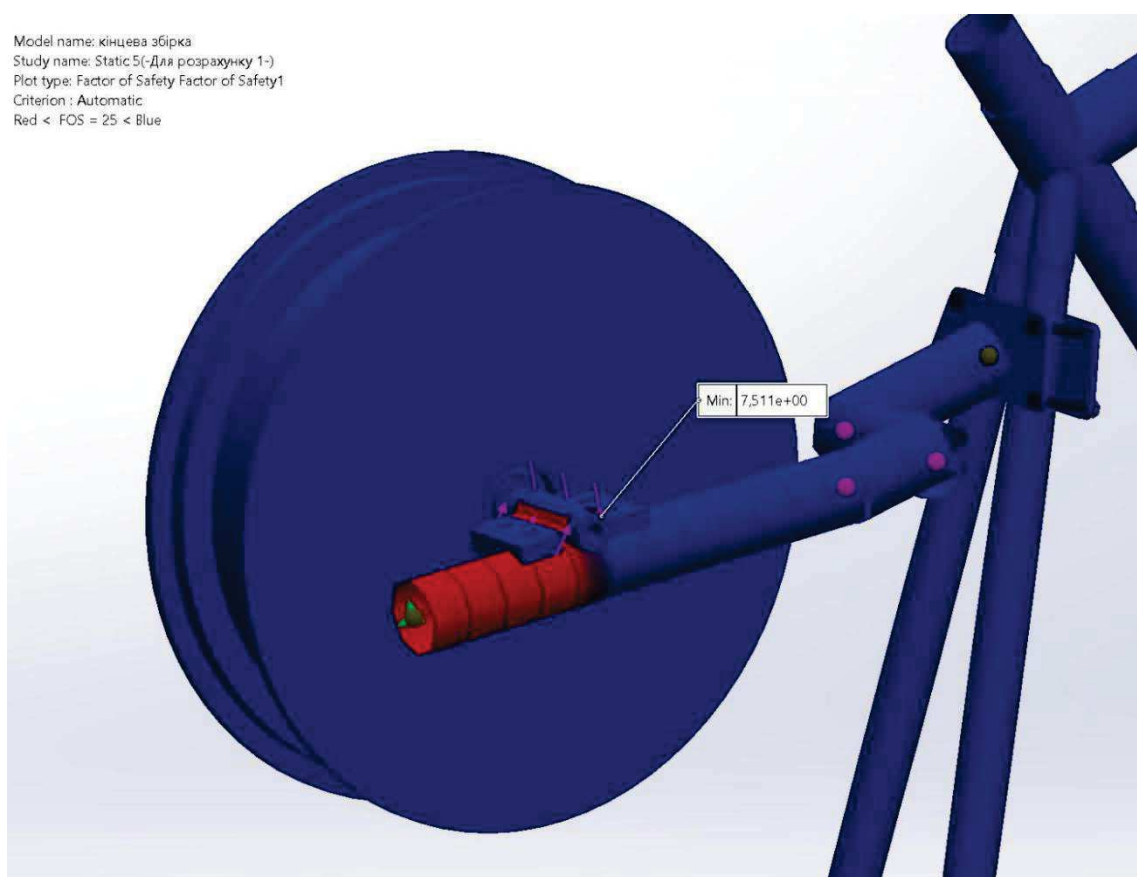


Рисунок 3.15 - Мінімальний FOS при використанні Сталь 3

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

БРМА 25.00.00.000 ПЗ

Арк.

49

Model name: кінцева збірка  
 Study name: Static 5 (для розрахунку 1)  
 Plot type: Factor of Safety Factor of Safety1  
 Iteration: Automatic  
 Factor of safety distribution: Min FOS = 4.5



Рисунок 3.16 - Мінімальний FOS

Максимальне переміщення 0,1 мм (рис. 3.17)

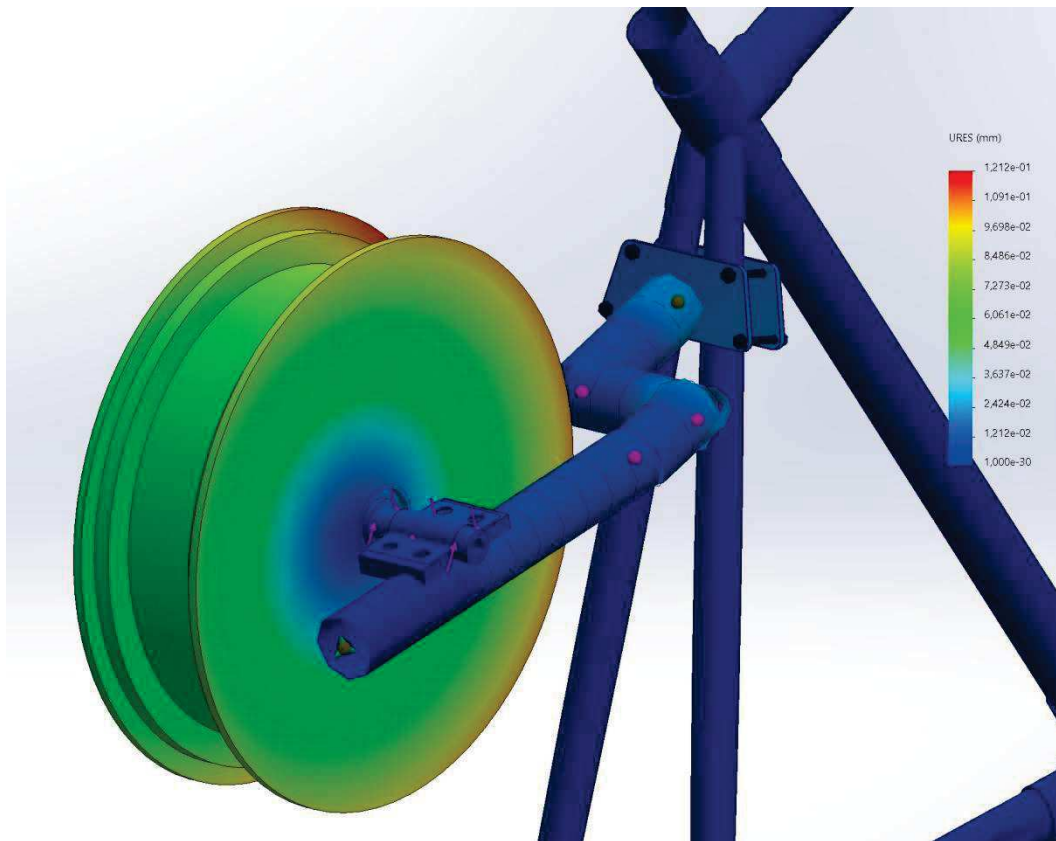


Рисунок 3.18 - Переміщення привода при використанні сталі 3

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

Так як коефіцієнт запасу міцності 4.534, було проведено оптимізацію, і при використанні алюмінію Alloy 1060, вдалося зменшити  $FOS = 1.281$  (рис 3.17). При цьому максимальні переміщення дорівнюють 0,337 мм (рис. 3.18).

Електропривід (без мотор-колеса) виготовлений з сталі 3 важить 775грам, після заміни матеріалу на алюміній Alloy 1060 став важити 584 грама.

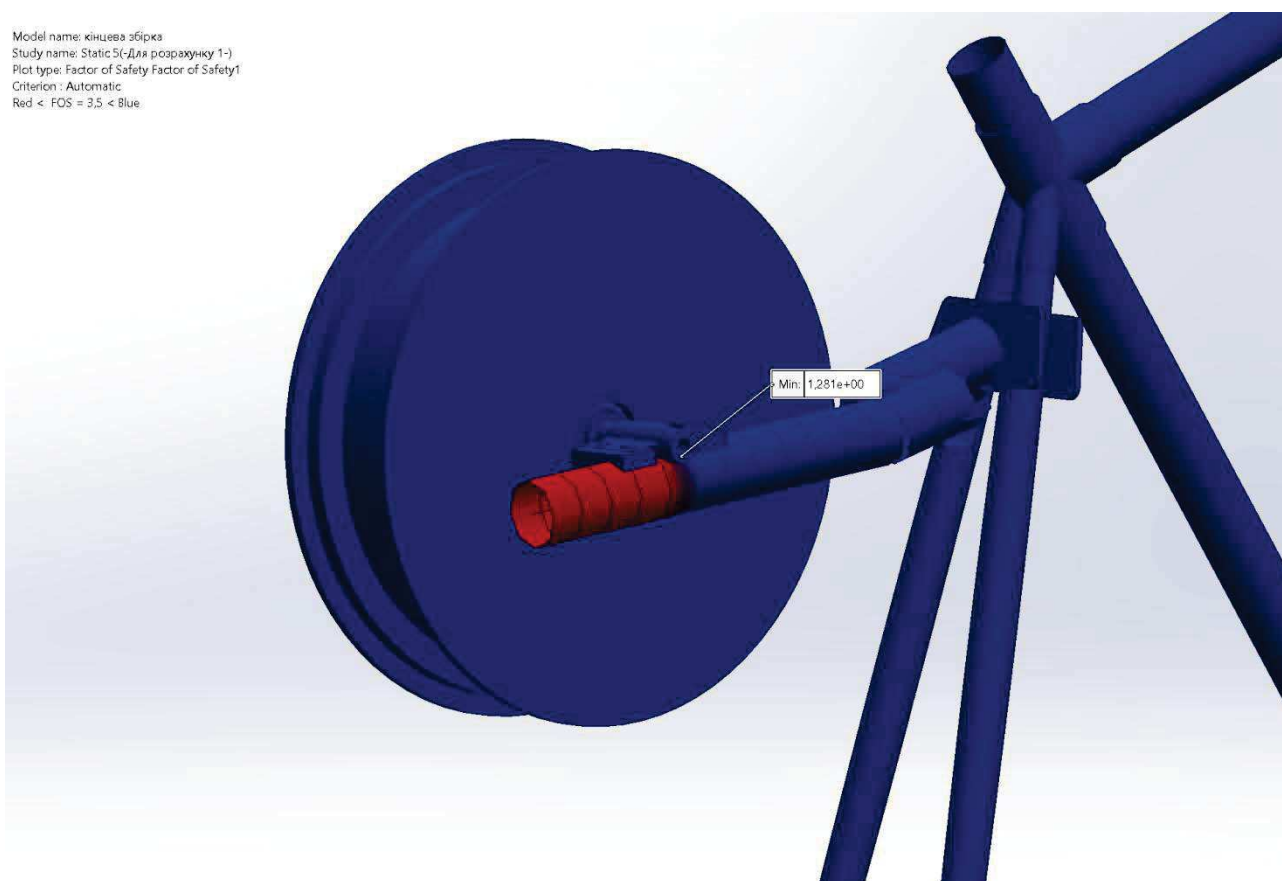


Рисунок 3.19 - Мінімальний FOS при використанні матеріалу Alloy 1060

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

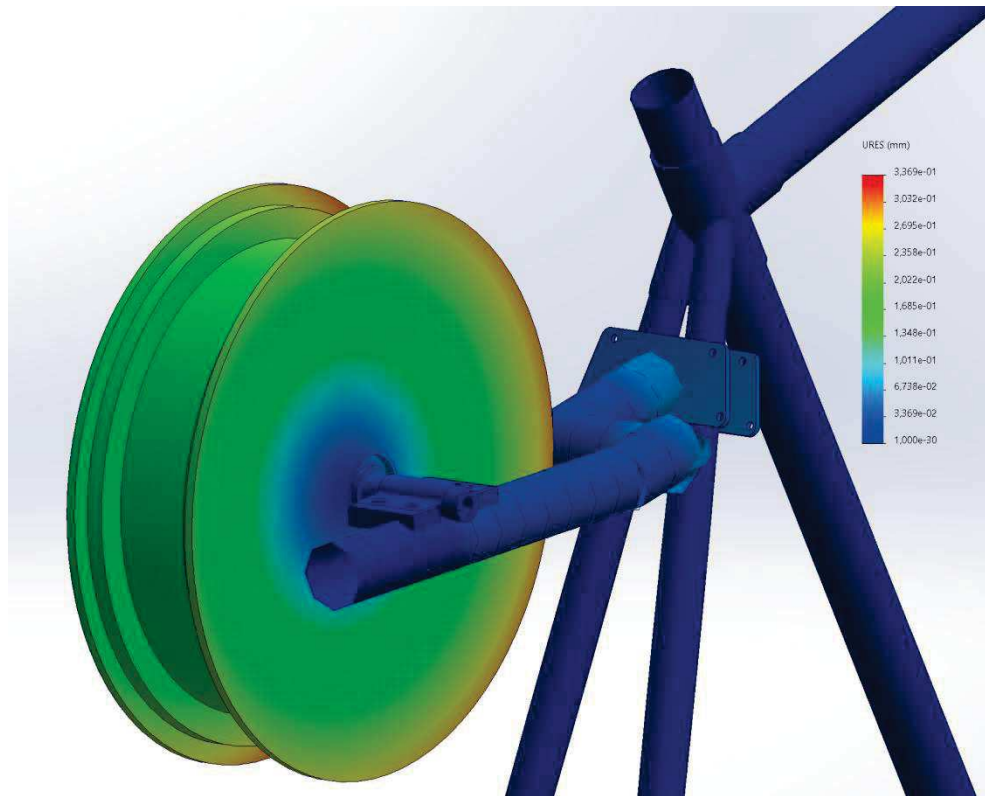


Рисунок 3.20 - Максимальні переміщення

З рисунка 3.14 і 3.18 видно, що запас міцності зменшився суттєво з 7,51 до 1,28. А маса при цьому знизилася з 775грам до 584 грама, що не суттєво. При тому, що ціна алюмінія значно вища за ціну сталі СТ 3

Алюміній доцільно використовувати лише в тих випадках, де необхідна корозійна стійкість, і є можливість пошкодження лакофарбового покриття. В усіх остальных випадках доцільніше використовувати сталь СТ 3.

Висновки до третього розділу:

У розділі 3 розраховано акумулятор, який має з'єднання елементів наступним чином: 10S4P.

Для розрахунку параметрів мотор-колеса були прийняті оптимальні початкові умови:

- маса електровелосипеда  $m_{ев} = 20$ кг;
- середня маса водія  $m_{в} = 70$  кг;
- середня маса вантажу  $m_{вт} = 10$  кг;

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

- діаметр колеса велосипеда  $D_k=26$  дюймів.

Розраховано, крутний момент мотор-колеса, а також крутний момент на колесі велосипеда, який становить 8,59 Нм. Розраховано теоретичний ідеальний момент, який складається з статичного і динамічного. При розрахунку статичного моменту було враховано, коефіцієнт тертя коліс об асфальт, опір повітря, який залежить від швидкості велосипеда в кубічній залежності, а також враховано що велосипед буде пересуватися не тільки по рівній дорозі, а і виїждати на підвищення, тому статичний коефіцієнт був збільшений з 3,6 Нм до 7,2 Нм.

Проведено розрахунок приводу в SolidWorks Simulation. Коефіцієнт запасу міцності дорівнює 7.511 Цей коефіцієнт з запасом і тому є можливість поставити набагато потужніший електродвигун, не змінюючи привід.

У зв'язку з великим коефіцієнтом запасу міцності 4.534, було проведено оптимізацію, і при використанні сталі 3, вдалося зменшити FOS = 3.202

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

## 4 ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

### 4.1. Тестування електроприводу

Спочатку було протестовано мотор-колесо діаметр 10,5 дюймів потужністю 200 Вт, при такому діаметрі, крутного моменту виявилось недостатньо, і тому при знятті покришки, діаметр зменшився до 8 дюймів, крутний момент збільшився на 25 відсотків, і цього достатньо для комфортної їзди. Наступні тести проводилися з мотор-колесом 200 Вт, 8 дюймів ( аркуш [БРМА 25.03.00.000 ДД] ).

Перевагою їзди без покришки є те, що контакт пластикового мотор-колеса з гумою велосипеда здійснюється по краях (рис.4.2), а саме в тих місцях, в яких при звичайній експлуатації велосипеда не задіюються, і тим самим, не стирає мотор-колесо покришку в робочому місці.



Рисунок 4.1 - реалізований електропривід велосипеда

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

Тестування електровелосипеда проводилось по рівній асфальтованій поверхні. Для визначення максимальної швидкості, пройденої відстані, була використана програма Samsung Health (рис 4.3) [1]. Також використовувався ватметр, який вимірює до 60В і Струм до 100А. Використовувався високострумний акумулятор з напругою 44.4В та ємністю заряду 2,5Ah [1].



Рисунок 4.2 - Фрикційна передача електровелосипеда

Після тестування побудовано наступні графіки [1].

Графік залежності струму від швидкості руху під час прискорення (рис.4.4) [1].

З графіка видно, що найбільшим є пусковий струм, який досягає - 13А. З набором швидкості струм зменшується, і при досягненні максимальної

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

швидкості струм дорівнює 4.5 А [1]. Найважчий режим роботи синхронного двигуна, як і будь-якого іншого при пуску, і тому, щоб зменшити навантаження на електродвигун, краще розігнатися на педалях хоча б до 7км/годину. При цій швидкості струм сягне 7А, а вже потім їхати на двигунові [1].

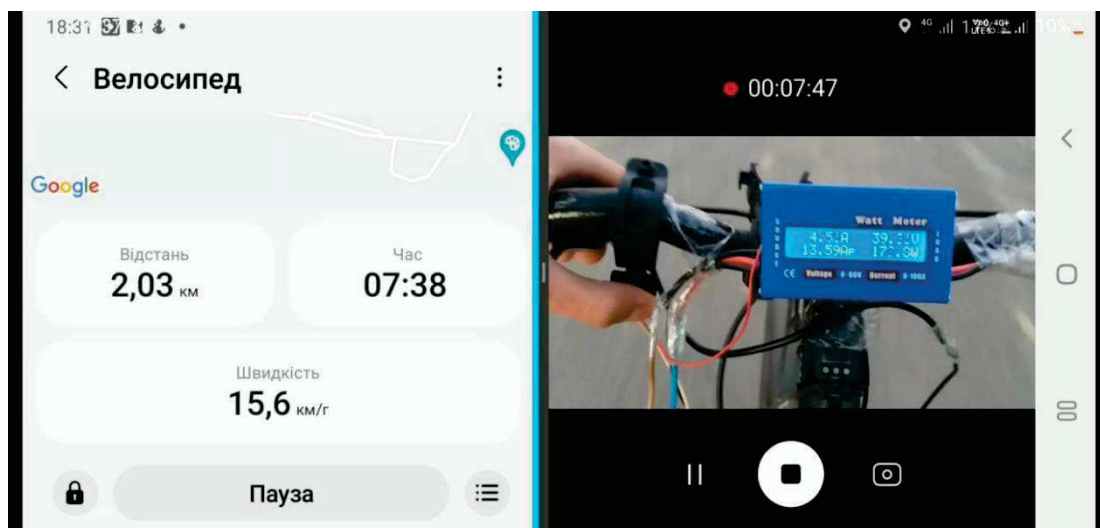


Рисунок 4.3 - Тестування електроприводу

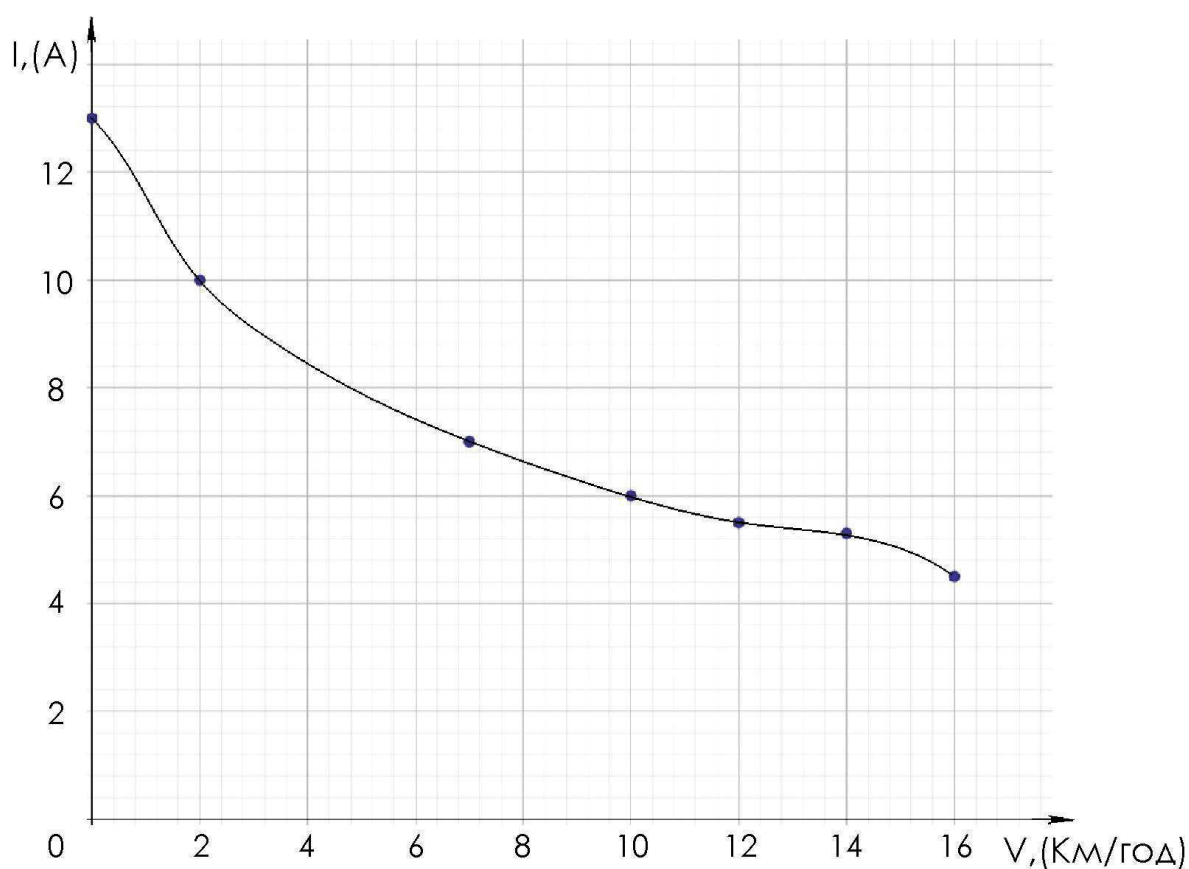


Рисунок 4.4 - Графік залежності струму від швидкості руху велосипеда

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56



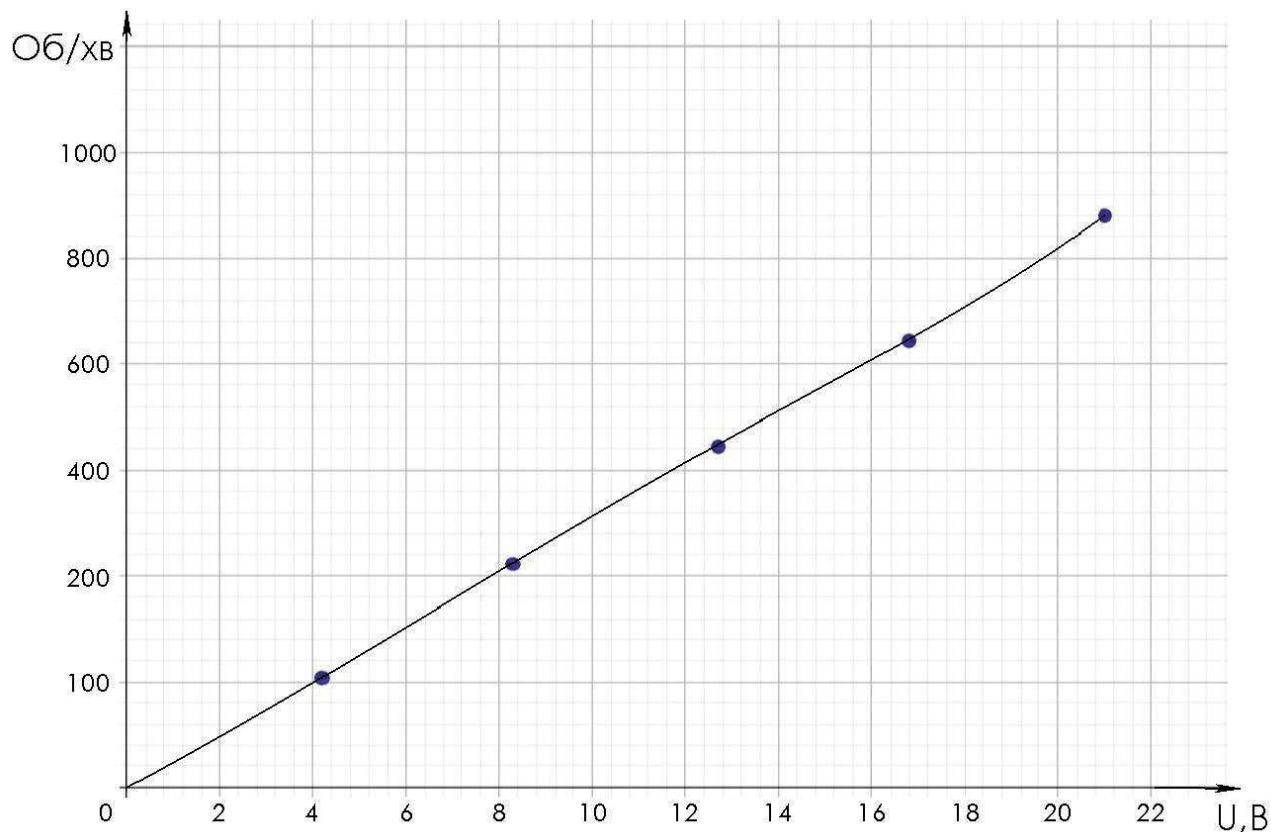


Рисунок 4.6 - Графік залежності частоти обертання від напруги

Розроблено друковану плату (рис 4.7)

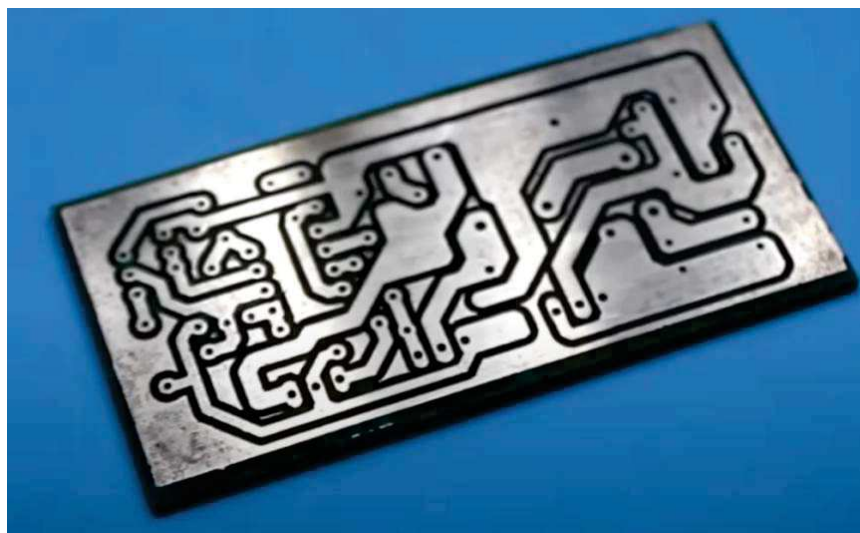


Рисунок 4.7 - Друкована плата стабілізатора напруги

При проектуванні використано програму EasyEda, та застосований односторонній фольгований склотекстоліт

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

На рис. 4.8 представлено загальний вигляд вузла стабілізатора

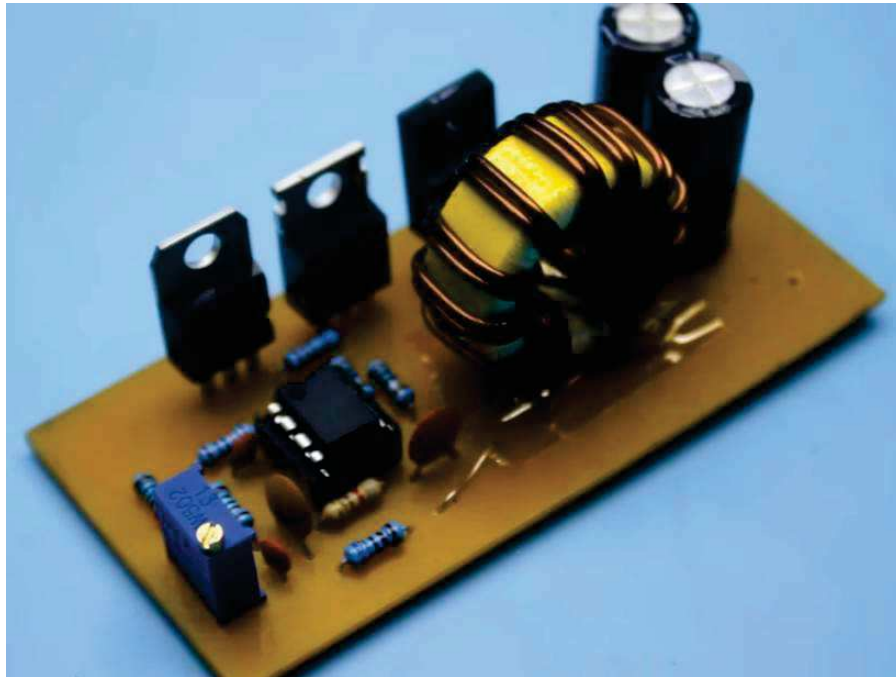


Рисунок 4.8 - Загальний вигляд стабілізатора напруги

Протестовано стабілізатор напруги. Так як вхідна напруга змінюється відповідно до обертів (рис. 4.6), необхідно щоб стабілізатор забезпечив стабільну вихідну напругу, незалежно від вхідної. Тому, що Li-iOn акумулятори дуже чутливі до параметрів зарядки. Стабільність вихідної напруги показана на рисунку 4.9. На вхід було подано від 12 до 20 В. На виході стабільно 15,88, як і було задано в цьому тесті.

Важливим параметром є стабільність вихідної напруги при різному струмові. Як видно з рисунка 4.9, При струмові 2,46 А, напруга просіла всього на 0,04В, що є дуже високим показником для стабілізатора.

										Арк.
										59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

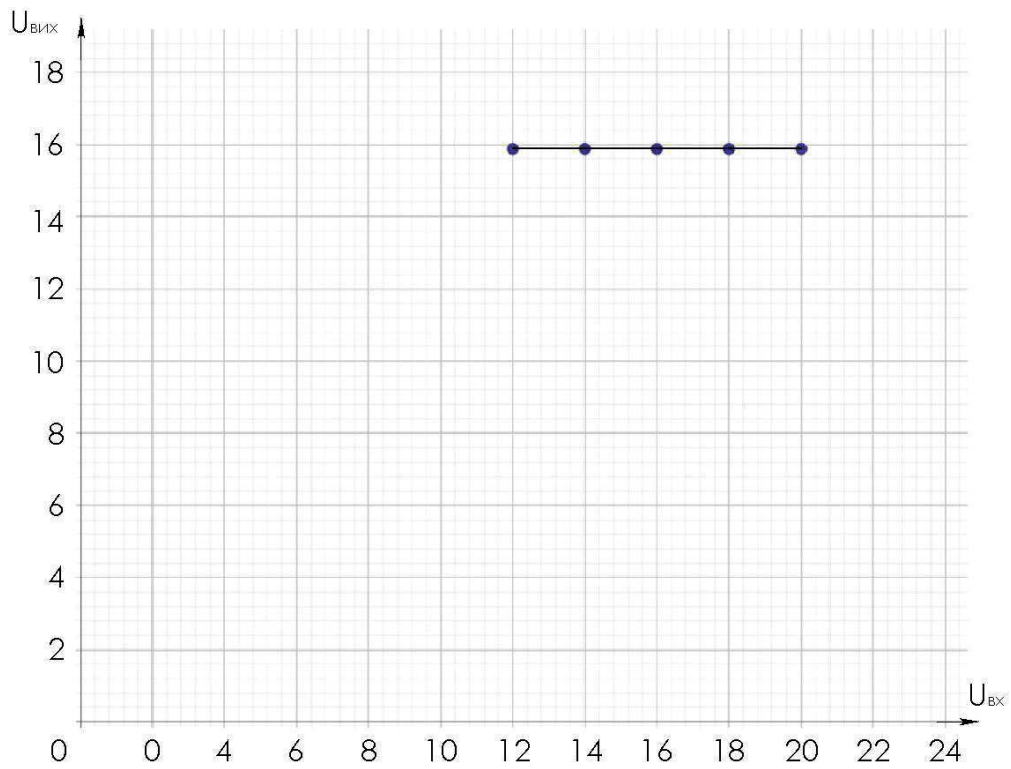


Рисунок 4.9 - Графік залежності вихідної напруги  $U_{Вих}$  від вхідної  $U_{Вх}$

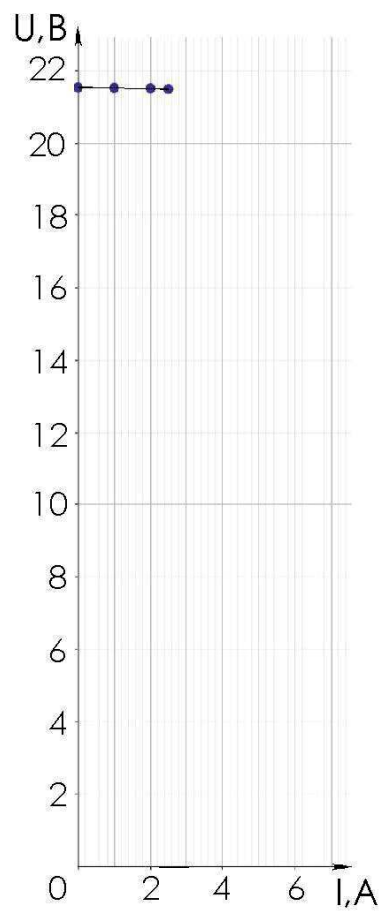


Рисунок 4.10 - Графік залежності Вихідної напруги від струму нагрзуки

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

#### 4.2 Висновки до четвертого розділу

Протестовано фрикційний електропривід до велосипеда. Тестування підтвердило високу енергоефективність системи - витрати енергії склали лише 1 А\*год на 3.6 км пробігу. Пусковий струм виявився значним (до 13А), однак його можна суттєво знизити за рахунок попереднього розгону педалями до 7 км/год.

Розроблена конструкція є легкою у реалізації, тому що спицьовка мотор-коліс в обід є досить важким процесом, і потребує навиків і спеціального інструменту, дозволяє швидко встановлювати на гірський велосипед, і не потребує обслуговування.

Протестовано стабілізатор напруги на просадку напруги при струмі до 2,5 А. Просадка всього 0,02В, що є дуже високим показником враховуючи простоту схеми.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

## ВИСНОВОКИ

У дипломному проєкті розроблено електропривід для велосипеда. Отримані наступні результати:

Виконано аналітичний огляд електроприводів, було розглянуто типи акумуляторів. Найбільш оптимальним по характеристикам і вартості є Li-ion, який і був використаний у акумуляторній батареї. Описано різні типи електродвигунів, висвітлено їх переваги і недоліки, найоптимальніший є мотор-колесо з гіроскутера, який і використовувався у розробленому електроприводі.

Оглянуто всі типи контролерів. Найоптимальніший контролер - це з модифікованою синусоїдою у тих випадках, якщо використовувати бюджетне моторколесо. Тому що при керуванні навіть синусні контролери відсікають частину синусоїди, і теж поступає спотворений сигнал, але конструкція синусного контролера набагато складніша, і його важче буде поремонтувати.

Розроблено три варіанта структурних схем реалізації електроприводу.

Перший варіант реалізований наступним чином. Мотор-колесо закріплено на задній вилці велосипеда і фрикційно передає крутний момент. Двигун має давачі Холла, для позиціонування двигуна в просторі. До контролера двигун підключається трьома фазними провідниками для живлення. З синхронного генератора до контролера також підключаються чотири провідники давачів Холла. Швидкість мотор-колеса регулюється через контролер ручкою газу. Контролер підключений до акумулятора номінальною напругою 36 В. Для рекуперації використовується стабілізатор напруги, який забезпечує стабільний заряд акумулятора при спуску велосипеда. Було обрано перший варіант, тому що він має весь необхідний функціонал для комфортного використання, і ремонтпридатність набагато вища, ніж у інших варіантів.

Розраховано основні параметри електроприводу і акумулятор.

Визначено момент, електродвигуна, а потім через передаточне співвідношення момент на колесі електровелосипеда. Розраховано потужність

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

електродвигуна, яка потрібна для подолання основних сил опору й задовільної динаміки руху. Для цієї задачі підійшло мотор-колесо від гіроскутера потужністю 200Вт. При використанні цього моторколеса максимальна швидкість електровелосипеда буде 20 км/год. Що цілком достатньо для пересування по місту.

Протестовано фрикційний електропривід до велосипеда. Тестування підтвердило високу енергоефективність системи - витрати енергії склали лише 1 А\*год на 3.6 км пробігу. Пусковий струм виявився значним (до 13А), однак його можна суттєво знизити за рахунок попереднього розгону педалями до 7 км/год.

Розроблена конструкція є легкою у реалізації, тому що спицьовка мотор-коліс в обід є досить важким процесом, і потребує навиків і спеціального інструменту, дозволяє швидко встановлювати на гірський велосипед, і не потребує обслуговування.

Протестовано стабілізатор напруги на просадку напруги при струмі до 2,5 А. Просадка всього 0,02В, що є дуже високим показником враховуючи простоту схеми.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Святушенко М., Поліщук О. Розробка фрикційного електроприводу для велосипеда. II Міжнародна наукова конференція студентів і молодих вчених «Проблеми та інновації у розвитку інженерії, технологій та транспорту» Хмельницький, 24-26 липня 2025. С. 510-520. URL: [https://drive.google.com/file/d/1MFIjlvCNQLQ43n0GvOcBIOj\\_-vZbalh/view](https://drive.google.com/file/d/1MFIjlvCNQLQ43n0GvOcBIOj_-vZbalh/view).

2. Status Quo Як вибрати мотор-колесо для велосипеда, URL: [https://poltava.sq.com.ua/ukr/news/novosti\\_partnerov/20.07.2021/yak\\_vibrati\\_motor\\_koleso\\_dlya\\_velosipeda](https://poltava.sq.com.ua/ukr/news/novosti_partnerov/20.07.2021/yak_vibrati_motor_koleso_dlya_velosipeda).

3. Hotbike Фронтальний двигун, середній мотор, задній мотор електричний велосипед, що краще? URL: <https://www.hotbike.com/uk/front-motor-middle-motor-rear-motor-electric-bicycle-which-is-better/>.

4. Rover service Все про електродвигуни для електровелосипедів, URL: <https://rover-service.com.ua/elektrodvyhuny-dlia-elektrovelosipediv/>.

5. Revolution Контролер XLD Brainpower XunLiDa та екран S866. Доступні мозок та очі електровелосипеда, 07.07.2020. URL: <https://www.onlyforus.com.ua/kontroler-xld-brainpower-xunlida-ta-ekran-s866-dostupni-mozok-ta-ochi-elektrovelosipeda/>.

6. CHILWEE. Які є різні типи BMS, 31.10.2023. URL: <https://ua.chilweebattery.com/news/what-are-the-different-types-of-bms-72844911.html>

7. Electropower JK BMS 8S-24S BD6A20S15P 150A Jikong Smart BMS Плата з вбудованим балансиrom 0.6A та Bluetooth, URL: <https://electropower.com.ua/bd6a20s15p/>.

8. Розрахунок потужності електродвигуна і ємності акумуляторної батареї електроприводу електровелосипеда / М. О. Ісип, Р.Ю. Семененко, С. Гончаров / *Інновації молоді в машинобудуванні. №2.*

9. Ісип М. О. Електромеханічна система електровелосипеда: дипломна робота. *Київський політехнічний інститут*, 2021. С. 30-33.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

10. Деталі машин. Курсове проектування: навч. посіб. / І. М. Пастух, В. О. Харжевський, В. П. Олександренко. Хмельницький. ХНУ, 2023. 242 с.
11. Журнал «Century Cycles». URL: <https://www.centurycycles.com/buyers-guides/bicycle-types-how-to-pick-the-best-bike-for-you-pg9.htm>
11. Вебсайт-канал «BetterHealth». URL: <https://www.betterhealth.vic.gov.au/health/healthyliving/cycling-health-benefits>
13. Kharzhevskiy V., Sviatushenko M. The usage of SOLIDWORKS Simulation for the design of welded metal structures with sheet metal elements on the example of warehouse racks. *Jaunasis mokslininkas*, 2024. Vitautas Magnus University, Lithuania. ISSN 1822-9913: Issue 21, P. 419-424. URL: <https://ejournals.vdu.lt/index.php/jm2022/article/view/5617/3351>.
14. Chang, K. H. 2024. Motion Simulation and Mechanism Design with SOLIDWORKS Motion 2024. SDC publications.
15. Kurowski, P. 2013. Engineering Analysis with SolidWorks Simulation 2013. SDC publications.
16. Howard, E., & Musto, J. 2005. Introduction to solid modeling using Solidworks. McGraw-Hill, Inc..
17. Mustapha, K. B. 2022. Practical Finite Element Simulations with SOLIDWORKS 2022: An illustrated guide to performing static analysis with SOLIDWORKS Simulation. Packt Publishing Ltd..
18. Verma G.2020. SolidWorksSimulation 2021 Black Book. CAD/CAM/CAE Works. 2020. 436 p.
19. Системи інженерного аналізу : методичні рекомендації до виконання індивідуальних завдань здобувачами першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» / В. О. Харжевський. Хмельницький. ХНУ, 2024. 70 с.

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

# ДОДАТОК А

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

# ДОДАТОК Б

					БРМА 25.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67