

České vysoké učení technické v Praze
Ústav přístrojové a řídicí techniky



Elektrifikace kola Favorit
Electrification of a bicycle

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Vojtěch Janeček
Vedoucí práce: doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.
Rok: 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Janeček** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **482440**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Elektrifikace kola Favorit

Název bakalářské práce anglicky:

Electrification of a bicycle

Pokyny pro vypracování:

- 1) vyberte vhodné komponenty (pohony, výkonovou elektroniku) pro doplnění elektrického pohonu na jízdní kolo
- 2) zapojte výkonovou elektroniku, pohony, ovládání
- 3) vytvořte mobilní aplikaci která bude zobrazovat vybrané informace o pohonu a jízdě
- 4) experimentálně ověřte funkce a vlastnosti

Seznam doporučené literatury:

Matthew Slinn: Build Your Own Electric Bicycle, McGraw Hill Professional 2010, ISBN 978-0-07-160622-6

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Martin Novák, Ph.D. odbor elektrotechniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **29.10.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **10.02.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne

.....
Vojtěch Janeček

Poděkování

Děkuji doc. Ing. Martinu Novákovi, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce a za podnětné návrhy, které ji obohatily.

Vojtěch Janeček

Název práce:

Elektrifikace kola Favorit

Autor: Vojtěch Janeček

Studijní program: Základy strojního inženýrství

Obor: Bezoborové

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.
Ústav přístrojové a řídicí techniky

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá přestavbou silničního kola Favorit na elektrokolo. V první části je definováno elektrokolo a představeny jeho jednotlivé součástky. Velký prostor je věnován motorům - konkrétně jejich druhům, konstrukci a řízení, a bateriím. Druhá praktická část této práce se věnuje samotné přestavbě. Začíná popisem vybraných dílů a jejich vlastností. Na něj navazuje postup sestavení setu a postup změny ovládání kola, aby bylo možné používat aplikaci v mobilním telefonu. Práce je uzavřena testováním kola a plánovanými vylepšeními.

Klíčová slova: elektrokolo, kolo, Favorit, elektromotor, baterie

Title:

Electrification of a bicycle

Author: Vojtěch Janeček

Abstract: The thesis deals with the issue of rebuilding road bike Favorit to e-bike. In the first part term e-bike is defined and its parts are presented. Large space is given to motors - specifically to their types, construction and control, and to batteries. The second practical part of this thesis deals with the process of rebuilding. It begins with the description of chosen parts and their characteristics. Then continues with the assembly of the bike and with the change of control so that it is possible to use an application in a mobile phone. The thesis ends with the testing of the bike and planned improvements.

Key words: electric bicycle, pedelec, bicycle, Favorit, electric motor, battery

Obsah

Seznam použitých zkratk	viii
Seznam obrázků	ix
Úvod	1
1 Elektrokola	3
1.1 Legislativa	3
1.2 Typy kol	4
2 Motory	5
2.1 Druhy elektromotorů - základní dělení	5
2.2 Konstrukce elektromotoru	6
2.2.1 Elektrotechnická část	6
2.2.2 Technická část	7
2.3 Řízení motoru	8
2.4 Ztráty	10
2.4.1 Mechanické ztráty	10
2.4.2 Elektromechanické ztráty	10
2.5 Trendy na trhu s elektrokoly	11
3 Baterie	13
3.1 Druhy	13
3.2 Umístění a péče	14
3.3 Dojezd	15
4 Praktická část práce	16
4.1 Požadované parametry a vlastnosti	16
4.2 Díly	17
4.2.1 Motor	17
4.2.2 Baterie	18
4.2.3 Řídicí jednotka a ovládání	19
4.2.4 Ostatní díly	19
4.3 Sestavení setu	21
4.3.1 Vystředění zadního kola	21
4.3.2 Upevnění motoru	22
4.3.3 Přidělení vodičů a zapojení konektorů	23
4.3.4 Testování setu	24
4.4 Ovládání kola pomocí mobilní aplikace	24
4.4.1 Komunikace	24
4.4.2 Programování	26
4.5 Další úpravy	28
4.6 Testování vylepšeného kola	31

4.7	Plánovaná vylepšení	31
	Závěr	33
	Bibliografie	34
	Přílohy	38
A	Kód arduina	38
B	3D tištěné obaly	43
C	Seznam použitého softwaru	46

Seznam použitých zkratek

AC Střídavý proud (*Alternating current*)

DC Stejnoseměrný proud (*Direct current*)

back-EMF *back electromagnetic force*

BMS Systém správy baterie *Battery management system*

UART Počítačová sběrnice sloužící k asynchronnímu sériovému přenosu dat
Universal asynchronous receiver transmitter

Seznam obrázků

1.1	AZUB MAX 700 (vlevo) [8], AZUB Ti FLY X (vpravo) [9]	4
2.1	Synchronní motor [14]	6
2.2	Rozložený BLDC motor [18]	7
2.3	Porovnání přímého a zpřevodovaného motoru [19]	7
2.4	Rozebraný motor s viditelnými ozubenými koly (vlevo) [20], Víko motoru s korunovým kolem (vpravo) [21]	8
2.5	Rozpad motoru [22]	8
2.6	Výstup Hallových sond, vracející se napětí z cívek, moment motoru a výstup řídicí jednotky [23]	9
2.7	Specialized Kenevo [30]	11
2.8	Coboc Torino 527 [31]	12
3.1	Akumulátorový článek 18650	14
4.1	Kolo před začátkem projektu	16
4.2	Štítek motoru	18
4.3	Baterie	18
4.4	Baterie v obalu	18
4.5	Řídicí jednotka	19
4.6	Ovladač na řídítka	19
4.7	Senzor šlapání	20
4.8	Kotouč s magnety	20
4.9	Senzor brzdění	20
4.10	Berany s brzdou	20
4.11	Dostavěné elektrokolo ze setu	21
4.12	Zakončení vidlice	23
4.13	Podložka s nekruhovým otvorem	23
4.14	Konektor XT-60	23
4.15	Měření osciloskopem	25
4.16	Aplikace mobilu	27
4.17	Schéma zapojení při testování	29
4.18	Obal hlavního systému	30
4.19	Obal pro senzor rychlosti	30
4.20	Dostavěné elektrokolo	30
4.21	Graf rychlosti v závislosti na čase	31
22	Víko senzoru rychlosti	43
23	Spodní část obalu senzoru rychlosti	44
24	Spodní část obalu senzoru rychlosti	44
25	Hlavní část obalu systému	44
26	Hlavní část obalu systému	44

27	Víko obalu systému	45
28	Držák na mobil	45
29	Držák na mobil	45
30	Držák pro PAS	45

Úvod

Jízdních kol v Praze přibývá a stejně tak i lidí, kteří cestují do práce na kole. Pro mnohé je cesta na kole řešením, jak se vyhnout dlouhému stání v kolonách, plné městské hromadné dopravě, či hledání parkovacího místa. Popudem ke zvýšení intenzity cyklistické dopravy bylo i vyhlášení nouzového stavu kvůli pandemii Covid-19. Podle webu cistoustopou.cz se od 12. března 2020, kdy byl vyhlášen nouzový stav, do června 2020 zvedl počet cestujících využívající kolo na cestě do práce o 39 %. Nicméně snaha lidí vyhnout se hromadné dopravě nebyla jediná proměnná ovlivňující rostoucí počet cyklistů. Oproti minulým létům se významně více investovalo do cyklistické infrastruktury, když oproti pouhým 17 milionům v roce 2017 bylo během roku 2020 použito 170 milionů korun [1]. Dále podle statistik vyplývajících z tiskové zprávy z prodejního portálu Heuréka se v březnu roku 2021 prodalo o 428 % více jízdních kol než v březnu předchozího roku. Zájem narůstá i v kategorii elektrokol, v první vlně lockdownu narostl jejich prodej dokonce ještě více než u klasických kol [2].

Nárůst oblíbenosti jízdních kol je způsoben i jejich větší dostupností v rámci Prahy. Přibývá sdílených kol i koloběžek dostupných skrze aplikace na mobilním telefonu. Momentálně fungují na ulici kola a koloběžky od čtyř firem. K růžovým Rekolům a modrým kolům od Nextbiku nově přibyla elektrokola značky Bolt a Lime. Mimo elektrokola dostupných pro veřejnost se spustil také projekt cargo kola, tedy elektrokola, která dopravují balíky z tzv. mikrodepa umístěného v pražském Těšňově ke koncovým zákazníkům a přispívají tak k čistšímu a ekologičtějším městu [3].

Je velmi pravděpodobné, že v budoucnosti dojde k dalšímu zvýšení počtu lidí používajících kola k dopravě v rámci snahy o snížení automobilní dopravy v Praze. Náměstek primátora Adam Scheinherr v rozhovoru pro Ekolist řekl, že pražské ulice jsou konstruovány pro menší objem automobilové dopravy, a to až o 20 % [4]. Vidět můžeme i nárůst placených parkovacích zón často časově omezených. Jedná se i o zpoplatnění vjezdu do centra Prahy, které by mohlo ve formě mýta proběhnout po dostavění pražského okruhu [5]. V rámci projektu Polad Praha se dále plánuje zvýšit počet chráněných značených cyklotras ze 173 km na 260 km [6]. Jízdní kola a elektrokola tedy v Praze rozhodně mají budoucnost.

Podíváme-li se blíže na problematiku elektrokol – tedy kol, které obsahují motor a pomáhají nám při šlapání – můžeme vidět, že mají oproti tradičním jízdním kolům hned několik výhod. Jejich užívání vyžaduje méně námahy, což je například v pražském poměrně kopcovitém terénu nespornou výhodou. S menší námahou jsou spojeny i nižší požadavky na fyzickou kondici a elektrokola jsou tak k dispozici i starším lidem. Je ovšem důležité mít na paměti, že ztráta svalového tonu vede i k horší rovnováze a používání elektrokol při velmi nízké kondici může vést k vážnějším zraněním, protože umožňují dosahovat vyšších rychlostí i méně zdatným cyklistům. Jejich používání seniory by tedy mělo být podporováno jen velmi opatrně. Nižší ná-

mahu spojenou s jízdou na kole ocení i lidé, kteří nemají možnost se po příjezdu do práce osprchovat či nechtějí jezdit ve sportovním oblečení. Rovněž převoz nákladů nás nestojí tolik energie, což může být pro mnohé velkou výhodou.

Mezi stinné stránky elektrokol patří jejich váha a vyšší pořizovací cena, se kterou také souvisí i vyšší riziko krádeže. Elektrokola, která se prodávají v České republice, začínají cenově zhruba na 20 tisících Kč v základní výbavě. Pro mnohé může být hlavní nevýhodou nutnost dobíjet baterii a celkově složitější servis a údržba. Dalším důvodem pro nepořízení elektrokola je, že velké množství lidí, kteří by zvažovali jeho koupi, už jízdí kolo vlastní a nechtějí si pořizovat další kolo, když obě kola nevyužijí.

Osobně jsem řešil stejný problém. Chtěl jsem jezdit do školy na jízdním kole, ale vzhledem k náročnému kopcovitému terénu bych musel vozit do školy i náhradní sadu oblečení a celkový přejezd by mi zabral poměrně dlouho. Řešením by tedy bylo pořídit si elektrokolo. Nicméně, jak už bylo zmíněno výše, pořizovací cena není nejnížší a také už jsem vlastnil své kolo, kterého jsem se nechtěl zbavovat. Elegantním řešením tohoto problému bylo přestavění mého kola na elektrokolo, čemuž se budu věnovat v této bakalářské práci. Jejím cílem je poskytnout soubor kritérií, které je nutné zvážit při úpravě vlastního kola, spolu s přehledem jednotlivých dílů, které můžeme použít. Vybírání součástí dle vlastního uvážení nám umožňuje větší kontrolu nad jízdními vlastnostmi upraveného kola spolu s jistotou, že elektrokolo bude splňovat legislativní podmínky České republiky.

Kapitola 1

Elektrokola

1.1 Legislativa

I když si to mnozí z nás neuvědomujeme, i jízda na klasickém kole na veřejné komunikaci spadá pod pravidla silničního provozu a nejenak je tomu i s elektrokoly. Samotná definice elektrokola a jeho odlišení od motocyklu je ovšem složitější.

V České republice jsou definiční znaky elektrokola uvedeny v bodě 8 oddílu C přílohy č. 12 k vyhlášce č. 341/2014 Sb., o schvalování technické způsobilosti a o technických podmínkách provozu vozidel na pozemních komunikacích, kde je stanoveno, že:

"Jízdní kolo může být vybaveno dodatečně pomocným motorkem, jestliže

- 1. bude nadále zachován původní charakter jízdního kola podle bodu 1 a 2,*
- 2. pomocný motorek bude přiměřeně plnit podmínky ustanovení § 19 zákona,*
- 3. jeho výkon nepřesáhne 1 kW,*
- 4. v případě použití spalovacího motoru, nebude mít takový motor objem válce nebo válců větší než 50 cm³,*
- 5. maximální konstrukční rychlost nebude vyšší než 25 km.h⁻¹ a*
- 6. montáž pohonného systému - motor, nádrž paliva nebo akumulátor na jízdní kolo, si nevyžádá zásah na jeho nosných částech.*

Pokud vozidlo splňuje všechny výše uvedené požadavky, považuje se pro potřeby této vyhlášky nadále za jízdní kolo."

Zároveň u nás platí i nařízení Evropského parlamentu a Rady EU č. 168/2013. To odpouští povinnost dozoru a registrace pro *"šlapací jízdní kola s pedály, která jsou vybavena přídatným elektrickým motorem s maximálním trvalým výkonem nižším nebo rovným 250 W, jehož motor je vyřazen z činnosti, jestliže cyklista přestane šlapat, a jinak je jeho výkon postupně snižován až do vyřazení motoru z činnosti, dokud rychlost vozidla nedosáhne 25 km/h" a "vozidla určená především pro využití v terénu a zkonstruovaná pro jízdu na nezpevněném povrchu"* [7]. Ohledně těchto dvou bodů se mezi výrobci elektrokol vedou rozepře, zda horské elektrokolo smí být osazeno motorem silnějším než 250 W.

1.2 Typy kol

Stejně, jako většinu motorových vozidel, můžeme rozdělit i kola do několika skupin. Dříve byla kola dělena jen do dvou kategorií na kola silniční a horská. Nyní však s jejich rostoucí oblibou vidíme, jako ostatně ve všech lidských činnostech, užší specializaci. Dnešním obvyklým dělením je dělení na kola silniční, horská, cyklokrosová/gravel, krosová/ treková, sjezdařská a další speciální. Většinou se ještě přidávají podkategorie dětské, dámské, pánské a seniorské.

Elektrokola se většinou dělí do stejných kategorií. Někteří prodejci toto dělení zjednodušují na horská a silniční (například krabcycles.cz). Norma ČSN EN 15194 kola vymezuje jízdní kolo s pomocným elektrickým pohonem EPAC. Tato zkratka vychází z anglického *electrically power assisted cycle* a v normě označuje: "jízdní kolo vybavené pedály a pomocným elektromotorem, vyjma pomocného režimu při spouštění". Uvedená norma dále definuje městský a trekový bicykl, jako: "bicykl určený pro použití na veřejných komunikacích především jako prostředek pro přepravu nebo rekreační účely". Taktéž je definován bicykl horský, jako: "bicykl určený pro použití mimo komunikace na nerovném terénu, na veřejných komunikacích a na veřejných cestách, je vybaven vhodně zesíleným rámem a jinými komponentami, obvykle s typickými pláštmi se širokým profilem se záběrovým dezénem a širokou škálou převodovek". Další kategorií je dle normy ČSN EN 15194 závodní bicykl, popisovaný jako: "bicykl určený pro amatérské použití k vysokým rychlostem na veřejných komunikacích, který má ovládací soustavu s více sevřenou pozicí umožňující aerodynamické držení těla, vícerychlostní převodovou soustavu, šířku pláště nemá větší než 28 mm a maximální hmotnost zcela smontovaného jízdního kola je 12 kg". Jako předposlední typ kola norma vymezuje lehokolo, v angličtině recumbent bicycle, jako: "jízdní kolo, kde je jezdec umístěn ve sklopené poloze vleže". Pro lepší představení vzhledu tohoto kola je níže uveden obrázek 1.1 dvojkolové a trojkolové verze od českého výrobce AZUB.



Obrázek 1.1: AZUB MAX 700 (vlevo) [8], AZUB Ti FLY X (vpravo) [9]

Posledním typem kol je dle normy jízdní kolo pro mládež, které je "určené pro použití na veřejných komunikacích pro mládež, jejichž hmotnost je nižší než 40 kg s maximální výškou sedla 635 mm nebo více, ale méně než 750 mm".

Kolo, se kterým jsem pracoval já a kterým se zabývá praktická část této práce, bychom tedy označili jako kolo silniční dle prodejců, případně jako kolo městské nebo trekové s náznakem kola závodního dle normy. Jako čistě závodní bychom jej mohli označit pouze při výrazném odlehčení, jinak by podle normy nesplňovalo parametry pro tuto kategorii.

Kapitola 2

Motory

Lidé si odjakživa chtějí minimalizovat námahu při jakékoliv své činnosti a jízda na kole není výjimkou. Někteří autoři uvádějí, že jízda na elektrokole je dokonce ekologičtější, než jízda na kole bez pomoci elektromotoru. To je dle semestrální práce Justina Lemire-Elmora způsobeno velkou účinností, s jakou tyto motory dokáží ope-rovat oproti práci lidské [10]. V dnešní době jsou již vyráběny motory s účinností 99,05 %. Motor s touto účinností není jen nějaký malý zkušební vědecký projekt. Jedná se o 44 MW šestipólový synchronní motor od společnosti ABB [11]. Motorům s takovouto účinností nelze, z pohledu primárních zdrojů, lidskou prací konkurovat. Je však nutno podotknout, že se jedná o velmi specifický výrobek. Tedy jeho účinnost bude vyšší, než u motoru pracujících mimo pracovní bod, jako jsou právě elektromotory pro kola, které pracují s velkým rozmezím otáček. Reálná účinnost motorů, které nalézáme v elektrokolech, je kolem 80 % při ideálních podmínkách (záleží hlavně na rychlosti a momentu).

Dalo by se říci, že elektromotor je nejdůležitější součástí elektrokola, neboť právě on jej dělá kolem elektrickým. Není tedy divu, že se jedná o druhou nejdražší součástku přestavby a proto mu také budu věnovat celou následující kapitolu.

2.1 Druhy elektromotorů - základní dělení

Elektromotory z pohledu toho, jaký typ proudu vstupuje do motoru či jeho řídicí jednoty, můžeme rozdělit do dvou kategorií, a to na stejnosměrné a střídavé motory. Do stejnosměrného motoru, v angličtině DC¹ motor, vstupuje stejnosměrný proud, který má v ideálním případě konstantní napětí (může se měnit vlivem řízení motoru). Do motorů střídavých, v angličtině AC² motor, vstupuje střídavý proud. Motor se tedy otáčí frekvencí vstupního proudu, nebo mírně nižší frekvencí. Použití těchto motorů pro elektrokola jsem nezaznamenal. V rámci e-mobility se používají pro elektroauta. Jinak hlavní využití tohoto typu motoru je v průmyslu. Změna otáček střídavého motoru je pak dosažena pomocí převodu na jinou než síťovou frekvenci. To lze například provést fázovým měničem.

Elektromotory stejnosměrné dále rozdělujeme na kartáčové a bezkartáčové. Kartáčovým motorům je dodáván stejnosměrný proud a pomocí komutátoru je měněna jeho polarita, díky tomu se poté motor točí. Komutátor je součástí motoru, která se skládá z odizolovaných lamel. Pomocí kartáčů či uhlíků je pak spojován kontakt

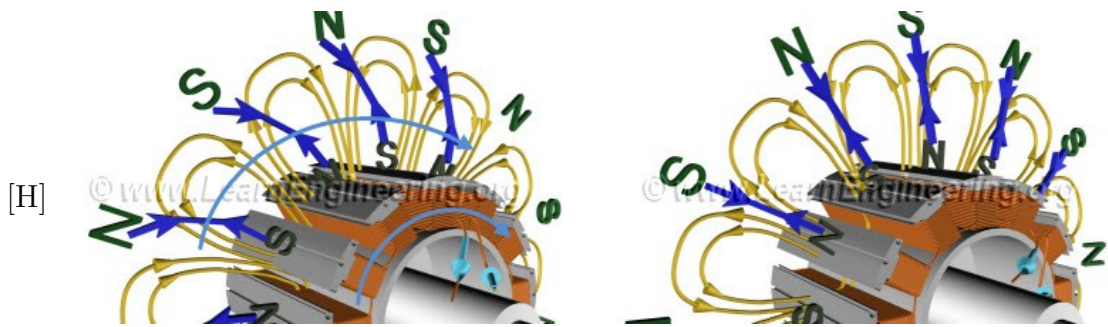
¹Stejnsměrný proud (*Direct current*)

²Střídavý proud (*Alternating current*)

mezi přívodními vodiči a lamelami cívek rotoru. Tento způsob usměrňování má ale několik nevýhod. Nejzásadnější je vyšší poruchovost a nutnost výměny kartáčů či uhlíků po mechanickém opotřebením, nicméně takovéto opravy jsou nutné relativně málo často. Další nevýhodou je hlučnost a jiskřivost tohoto typu motoru. Právě vznik jisker je důvodem, proč se tyto motory nepoužívají v prostředích s nebezpečím výbuchu. Jejich velkou výhodou je však jejich cena, tento motor nepotřebuje pro běh příliš složitou elektroniku, tudíž jej lze rychle a levně vyrobit [12].

Dalším typem stejnosměrného motoru je motor bezkartáčový, anglicky brushless DC motor (BLDC). Tento výrobek odstraňuje neduhy svého předchůdce tím, že se zbavil komutátoru a o jeho ovládání se stará řídicí jednotka. O možnostech ovládání tohoto motoru se zmíním níže v podkapitole Řízení motoru. Rozšíření tohoto motoru je poměrně značné a má široké spektrum využití. Tento typ elektrického motoru má užití od modýlků na dálkové ovládání až po Mars Rover [13]. Konstrukci těchto motorů si podrobněji probereme v následující kapitole.

Střídavé elektromotory můžeme také rozdělit do dvou kategorií, na motory synchronní a asynchronní. Pokud je frekvence otáček motoru v ustáleném stavu stejná s frekvencí vstupního proudu, jedná se o synchronní motor (viz obrázek 2.1), pokud tomu tak není, jedná se o motor asynchronní.



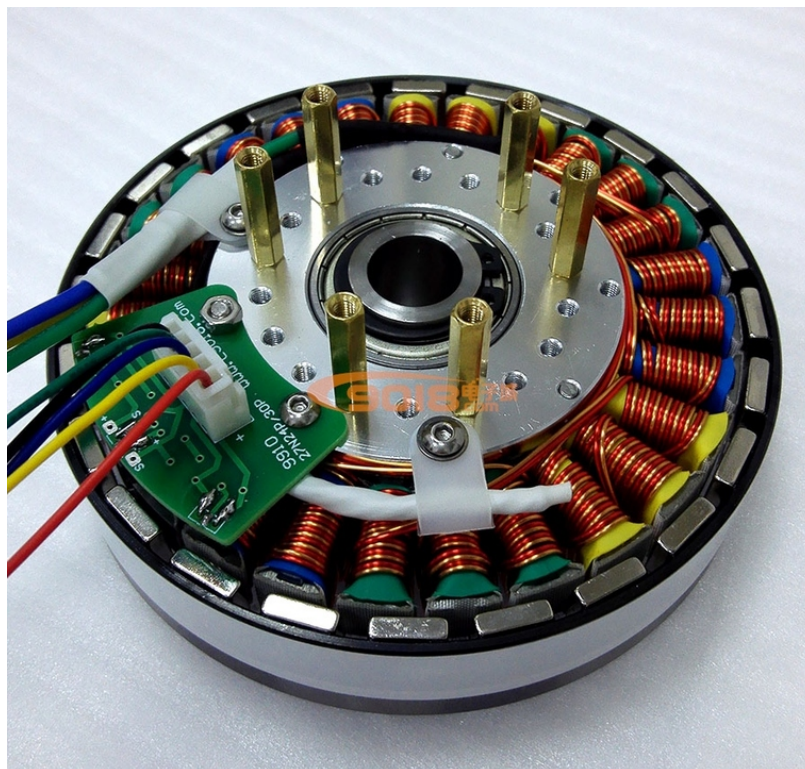
Obrázek 2.1: Synchronní motor [14]

2.2 Konstrukce elektromotoru

2.2.1 Elektrotechnická část

Oproti známé konstrukci komutátorových stejnosměrných elektromotorů se BLDC motory liší tím, že mají pevné vinutí statoru a rotor je osazen permanentními magnety [15]. Jak je vidět na obrázku 2.2, stator se skládá ze tří dvojic vinutí, které jsou vůči sobě natočeny o 120° . Permanentní magnety můžeme vidět na vnitřním obvodu vnějšího pláště motoru. Ty jsou pro tuto aplikaci nejčastěji lepeny. Při výběru lepidla je však důležité si uvědomit ztráty v motoru, které jsou podrobněji popsány níže. Ty také způsobují zahřívání motoru. Toto zahřívání pak může magnety odlepit, snížit jejich sílu, nebo dokonce trvale odmagnetizovat [16] [17]. Dále si můžeme na obrázku všimnout desky plošných spojů, na které jsou usazeny Hallové sondy, které jsou používány k zjištění natočení rotoru vůči cívkám. Toto je jeden z možných typů řízení, které je dále rozebráno níže v již avizované části o řízení motoru.

[H]



Obrázek 2.2: Rozložený BLDC motor [18]

2.2.2 Technická část

Existuje několik možných konstrukcí motoru do náboje kola. Můžeme je rozdělit na motory přímé, to znamená, že motor neobsahuje převodovku a otáčky motoru jsou totožné s otáčkami kola, a motory zpřevodované.

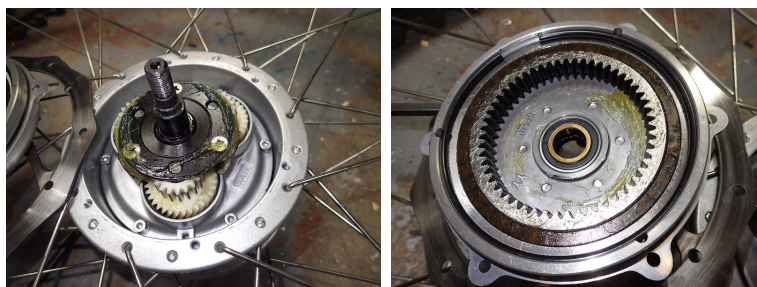
Přímé motory tedy nejsou zpřevodovány. To je činí méně komplikovanými. Často ale neobsahují volnoběžné spojky, tudíž je potřeba řešit regeneraci energie. S regenerací je spojeno brždění kola a následné zpomalování bicyklu. Rovněž jsou přímé motory oproti druhému typu motoru větší, těžší a mají nižší dojezd.



Obrázek 2.3: Porovnání přímého a zpřevodovaného motoru [19]

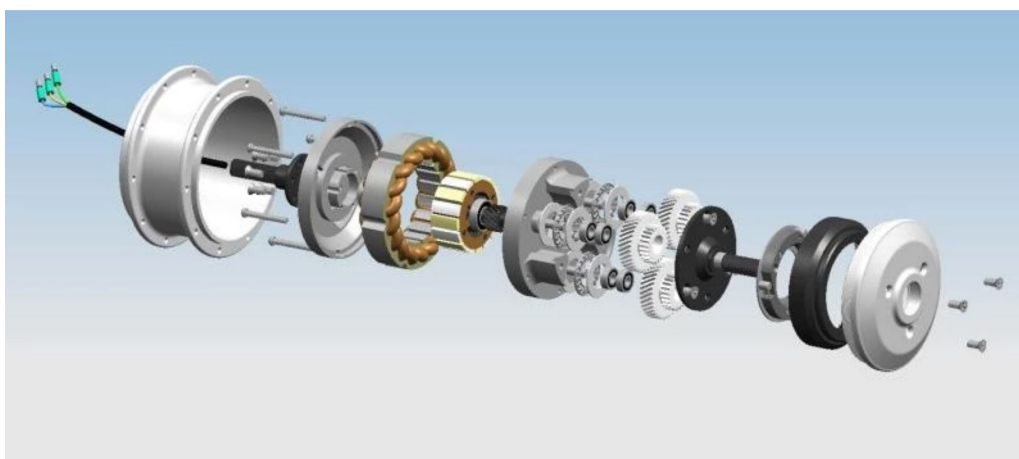
Zpřevodované motory jsou na trhu nejpopulárnější volbou, umožňují použití

motorů s nižším točivým momentem a vyššími otáčkami, které jsou levnější na výrobu. Jejich rozměr je také výrazně menší, jak je patrné z obrázku 2.3. Tento typ motoru má však jinou nevýhodu a tou je hlučnost. Hlavním zdrojem hlučnosti tohoto motoru jsou převody. Na obrázku 2.4 můžeme vidět rozloženou dvoustupňovou převodovku motoru. Ta je častou volbou u těchto elektromotorů. Také se můžeme setkat s jednostupňovými převodovkami. V této práci je blíže popsána převodovka dvoustupňová, jelikož je využita v motoru praktické části této práce.



Obrázek 2.4: Rozebraný motor s viditelnými ozubenými koly (vlevo) [20], Víko motoru s korunovým kolem (vpravo) [21]

Výstupem elektromotoru je malé ozubené kolo se šikmým ozubením. To zabírá s třemi většími šikmými ozubenými koly, která jsou spojena s třemi menšími přímými ozubenými koly, která zabírají s korunovým kolem, které je připojeno k volnoběžné spojce přišroubované k víku. Unášec druhého stupně planetové převodovky se neotáčí a přenáší moment motoru do rámu bicyklu. Volnoběžná spojka umožňuje kolu se volně otáčet v situaci, kdy motor není používán. Na obrázku 2.5 si můžeme prohlédnout rozpad modelu elektromotoru, na kterém vidíme jednotlivé díly, ze kterých se skládá bezkartáčový stejnosměrný motor do náboje kola s dvoustupňovou převodovkou.



Obrázek 2.5: Rozpad motoru [22]

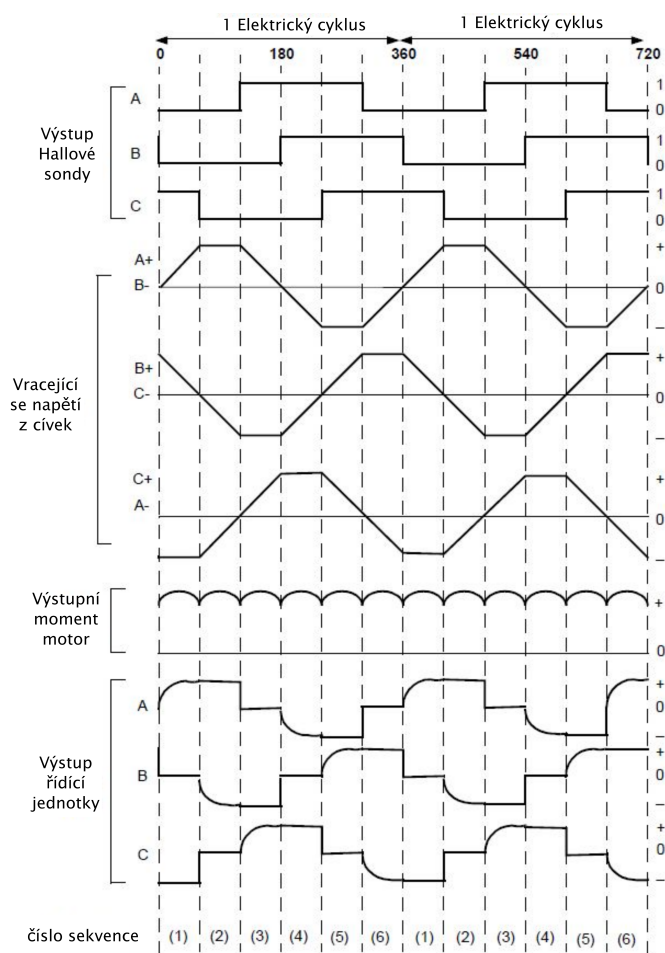
2.3 Řízení motoru

V této části si popíšeme možnosti řízení synchronního bezkartáčového elektromotoru na stejnosměrný proud. Tento typ motoru oproti jeho kartáčovému předchůdci nelze přímo připojit ke zdroji. Je tedy potřeba dalších elektrosoučástí. K

tomu, abychom mohli elektricky komutovat, musíme vědět, jak je motor natočen. To se v praxi zjišťuje buď pomocí Hallových sond, nebo pomocí měření indukovaného napětí.

Pro zjištění natočení se používají tři Hallové sondy, které zkoumají přítomnost magnetického pole. Poté tato data posílají do řídicí jednotky, která je následně zpracovává. Hlavní výhodou oproti měření takzvaného back-EMF³ je možnost měření a ovládní motoru od nulových otáček.

Druhým způsobem měření natočení je měření indukovaného napětí v nepoužívané cívce. Tento typ měření snižuje počet dílů v motoru a tedy i složitost výroby. Motory s tímto přístupem k zjištění natočení bývají levnější. Nicméně řídicí jednotky, které umí měřit vracející se napětí, bývají dražší. Je tedy na uživateli, kterou možnost zvolí. Řídicí jednotka pak čeká na průchody nulou, z kterých pak vyvozuje natočení. Velkou nevýhodou tohoto typu ovládní je nutnost otáčení. Řídicí jednotka je tedy při nulových otáčkách nucena pustit proud do dvou libovolných cívek a poté po průchodu nulou fungovat dle natočení rotoru. Motor tohoto typu v aplikaci pro elektromobilitu při rozjezdech může mít menší moment [23] [24].



Obrázek 2.6: Výstup Hallových sond, vracející se napětí z cívek, moment motoru a výstup řídicí jednotky [23]

Na obrázku 2.6 vidíme výstupy z Hallových sond, zidealizované měření indukovaného napětí, předpokládaný moment na motoru a ideální výstup řídicí jednotky.

³back electromagnetic force

2.4 Ztráty

Ztráty elektrokola můžeme rozdělit na ztráty mechanické a elektromechanické. Mechanické ztráty jsou například odpor vzduchu, neúčinnost řetězového a ozubeného převodu, odpor v ložiscích a valivý odpor. Největšími elektromechanickými ztrátami u elektrických motorů pro elektrokola jsou ztráty ve statoru a ztráty v železe.

2.4.1 Mechanické ztráty

Při časovce na klasickém kole tvoří odpor vzduchu přibližně 90% všech odporů zabraňujících v jízdě [25]. Cyklista ve vzpřímené poloze má plochu branou kolmo vůči proudění vzduchu přibližně $A = 0,5\text{m}^2$ a součinitel odporu $C_x = 1,1$ [26]. Pokud bychom použili a dosadili do Newtonova zákona odporu, pro vzduch na úrovni moře, získáváme:

$$F = \frac{1}{2}\rho C_x A v^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 1,1 \cdot 0,5^2 = 0,33v^2 \quad (2.1)$$

Tedy síla, kterou cyklista musí překonat, je 0,33 násobek kvadrátu rychlosti. Pokud bychom stejný výpočet provedli pro Mercedes EQS, který je jedno z produkčních aut s nejnižším součinitelem odporu, měli bychom:

$$F = \frac{1}{2}\rho C_x A v^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 0,2 \cdot 2,51 \cdot v^2 = 0,3v^2 \quad (2.2)$$

Pokud tedy cyklista jede ve vzpřímené komfortní poloze, síla odporu vzduchu je pro něj větší, než síla působící na nový automobil. Toto samozřejmě přestává platit pro jezdce při jízdě v aerodynamičtější tvaru, v jakém často můžeme vidět závodníky na silničních kolech. Tímto tvarem závodníci snižují plochu i součinitel odporu. Dosahují pak síly odporu vzduchu, která odpovídá 0,19 násobku kvadrátu rychlosti.

Ve většině případů využití kola používáme řetězový převod. Ten však disipuje dodanou energii vytvořenou námi nebo motorem, pokud používáme středový motor. Postupným vývojem byl tento způsob přesunu rotačního pohybu zefektivněn na 87% - 97% [27]. Odpor v ložiscích a valivý odpor pak velmi záleží na typu kola i ložisek a řadě dalších proměnných, jejichž podrobný popis by přesáhl rámec této práce.

2.4.2 Elektromechanické ztráty

Jak jsem již zmínil, největší ztráty v elektromotoru jsou ztráty ve statoru, také známé jako ztráty ve vinutí, a ztráty v železe. Statorové ztráty jsou způsobeny Joulovým teplem, které je důsledkem Joule-Lenzova zákona. Joulovo teplo vzniká srážkami elektronů se zbytkem vodiče při průchodu proudu. Tyto srážky jsou také zdrojem odporu ve vodiči [28]. Joule-Lenzův zákon nám říká:

$$Q_J = UIt = I^2 R t \quad (2.3)$$

Ztráty způsobené tímto převodem na teplo se v anglické literatuře označují jako copper losses, neboli ztráty v mědi, přestože měď není vodičem, nebo I^2R ztráty. Rovnice 2.3 nám tedy říká, kolik tepla vydá vodič s daným odporem, při daném proudu, za určitý čas. Tento typ ztráty je dominantní ztrátou při vyšším zatížení motoru a při nízkých otáčkách. Tato ztráta nezávisí na rychlosti otáčení elektromotoru.

Ztráty v železe je souhrnné označení tří typů ztrát. Tvoří je ztráty způsobené hysterezí, ztráty způsobené vířivými proudy a další ztráty [29]. Všechny tyto ztráty u motoru závisí na rychlosti. Ztráty způsobené hysterezí vznikají procházením magnetického pole materiálem. Jednotlivé náboje v zrnech oceli se následně otáčejí a tím ubírají sílu procházejícímu poli. Této ztrátě lze zabránit zvýšením kvality oceli. Ztráty odpovídají násobku úhlové rychlosti. Druhý typ ztrát - ztráty způsobené vířivými proudy - se tvoří indukovaním proudu v uzavřené smyčce změnou magnetického pole dle Faradayova zákona. Proud se indukuje kolmo k magnetickému poli. Pro snížení této ztráty se jádro skládá z plechů, které zvyšují odpor jádra.

2.5 Trendy na trhu s elektrokoly

V posledních letech je mezi výrobci viditelný trend používat středové motory, které se v angličtině nazývají mid motor/drive. Tento motor má několik výhod, jako je například malý posun těžiště kola či to, že jeho použitím nedochází k přidání neodpružené váhy. Z těchto výhod nejvíce těží kola sjezdová, jako je například Specialized Kenovo na obrázku 2.7 (cena: 210 000 Kč.)



Obrázek 2.7: Specialized Kenovo [30]

Elektrokola se středovými motory mají rovněž možnost měnit převody na zadním náboji pomocí klasické kolové kazety a tím udržovat elektromotor v efektivních otáčkách (50-100 rpm). To má za následek delší dojezdy a menší zahřívání motoru, což ocení většina uživatelů. Další výhodou elektrokola tohoto typu je možnost jednoduché demontáže předního i zadního kola, bez potřeby manipulace s elektroinstalací. Stinnou stránkou těchto motorů je to, že si zákazník nemůže motor jednoduše sundat a používat elektrokolo jako obyčejné jízdní kolo a tudíž je nucen vozit zátěž navíc. V případě poruchy elektromotoru nebo některé z dalších částí pohonu je zákazník zcela závislý na výrobci a na tom, zda daný typ stále vyrábí. Pokud by tomu tak nebylo, byl by uživatel nucen složitě shánět náhradu jinde, případně si koupit celé nové elektrokolo, což vzhledem k jeho poměrně vysoké pořizovací ceně - částky začínají zhruba na 40 000 Kč - není ideální variantou.

Druhou variantou jsou elektromotory v náboji, v angličtině označované hub motor/drive. Na rozdíl od středových motorů není třeba při poruše těchto motorů vyměňovat celé jízdní kolo. Kdykoli se majitel rozhodne změnit si motor či zcela ho odstranit, znamená to pro něj pouze výměnu výpletu případně změnu konektorů či přidání redukce. Velkým plusem je rovněž nezávislost motoru na typu kola. Jediné, na co si je potřeba dávat pozor, je šířka motoru, typ upevnění a u zadních motorů typ kazety. Oproti středovému motoru je motor umístěn přímo na zadním kole a nezvyšuje namáhání řetězu, ložisek a ozubených kol. Příkladem kola s motorem v náboji je například Coboc Torino 527, viz obrázek 2.8.



Obrázek 2.8: Coboc Torino 527 [31]

Kapitola 3

Baterie

Baterie je v dnešní době nejdražší součástí při přestavbě elektrokola (zhruba dvakrát dražší, než samotný motor). Stejně jako u motorů existuje více různých typů baterií, které se liší svými vlastnostmi. V této kapitole je uveden stručný popis nejpoužívanějších variant baterií spolu s jejich charakteristikami. Příkladem těchto charakteristik je třeba nejčastěji zmiňovaná a lehce kontroverzní kategorie dojezd, ale o tom se podrobněji zmíním níže.

3.1 Druhy

V dnešní době na trhu s bateriemi pro elektrokola dominují baterie typu Li-ion (lithium iontové). Nejpoužívanějším typem akumulátorových článků pro výrobu battery packů jsou články 18650. Tedy válečky o průměru 18 mm a výšce 65 mm. Většinou každý tento akumulátor má napětí 3,5 V až 3,7 V a kapacitu 1600 mAh až 4800 mAh. Akumulátorové články se pak skládají paralelně pro zvýšení kapacity nebo do série pro zvýšení napětí. Li-ion baterie mají oproti ostatním typům baterií vyšší hustotu energie, tedy jsou lehčí nebo menší při zachování stejné kapacity. Oproti ostatním se mohou také vybíjet poměrně silným proudem, a to až 40 A. V praxi se ovšem takto rychlé vybíjení nepoužívá. Jedním z důvodů je nárůst teploty, který by při takto rychlém vybíjení nastal. Místo 40 A je reálnější špičkový proud okolo 20 A. Na druhou stranu poměrně velkou nevýhodou těchto baterií je jejich cena a teplotní rozmezí, ve kterém se mohou používat a nabíjet. Li-Ion články se smějí nabíjet v rozmezí od 0°C po +45°C a vybíjet teoreticky od -20°C po +60°C. Optimálně je toto okno menší a uvádí se +15°C až +35°C, nicméně vždy je třeba řídit se podle doporučení výrobce [32]. Li-Ion baterie je v několika ohledech vhodná pro použití v elektrokolech. Válečky jednotlivých článků jdou uspořádat do velkého množství tvarů, díky tomu lze akumulátory lépe přizpůsobit jednotlivým rámcům kola.



Obrázek 3.1: Akumulátorový článek 18650

Dalším typem baterie jsou články typu lithium-polymer (Li-Pol, LiPo). Nicméně tento typ se pro elektrokola příliš nepoužívá, hlavně z důvodu vyšší ceny a citlivosti vůči nabíjení, vybíjení a mechanickému poškození. Baterie typu LiPo používají místo tekutého elektrolytu vodivý polymer a můžeme je nalézt například v mobilních telefonech, noteboocích, zařízeních na dálkové ovládání nebo vozidlech [33].

Posledním zástupcem na bázi lithia jsou články lithium-železo-fosfátové. Tento typ se používal hlavně dříve. V současnosti se u elektrokol nepoužívá - má o 50 % vyšší hmotnost oproti Li-Ion, ale stále je využíván u elektroskútrů nebo jako náhrada olověných akumulátorů. Jeho výhodou je nižší výrobní náklady [34], velké rozmezí pracovních teplot a použitelnost po velké množství cyklů (například 5000) spolu se schopností zvládat velké nárazové vybíjecí proudy, díky nízkému vnitřnímu odporu [35].

Další používaný typ článků a poslední, o kterém se tady zmíním, je Nikl-metal hydridový (NiMH). Na rozdíl od výše popsanych typů baterií není založený na bázi lithia. Mezi jeho plusy patří možnost rychlého nabíjení a jednoduchost skladování, jelikož článku nevadí skladování ve vybitém či plně nabitém stavu. Tento článek dokonce již dnes netrpí paměťovým efektem, jak tomu bylo dříve, či u jeho předchůdce, u nás již zakázaného, nikl-kadmiového článku (NiCd).

3.2 Umístění a péče

U elektrokol se setkáváme se dvěma umístěními baterie. Buď má kolo baterii přímo v rámu, tu označujeme jako baterii integrovanou, nebo má baterii mimo rám. U prvního typu, tedy u baterie přímo v rámu, je problém s výměnou baterie - tu můžeme chtít vyměnit z důvodu stáří a opotřebení či jiného poškození. Možností je buď vyměnit články a nebo doufat, že výrobce vyrábí baterii náhradní, kterou je možno koupit samostatně. U druhé možnosti umístění se baterie nachází, jak již ostatně vypovídá z názvu, mimo rám. Konkrétně se může nacházet například za sedlovou trubkou, pod horní rámovou trubkou nebo také na nosiči nad zadním kolem. Umístění baterie je důležitá součást stavby elektrokola, kterou bychom neměli podcenit. Baterie je nejtěžší součástí elektro přestavby a v mém případě je dokonce těžší než celý bicykl. Při nevhodném umístění či špatném uchycení může výrazně snížit kvalitu jízdy a být dokonce nebezpečná.

Baterii je dobré chránit před závadami a chybami uživatele, jelikož náležitá péče, poměrně logicky, prodlužuje její životnost. Z tohoto důvodu je také v baterii velmi často ochranný prvek, který se v praxi označuje jako BMS¹. Jeho úkolem je balancovat jednotlivé články, aby nebyl velký rozdíl napětí a neproudil zbytečně mezi nimi proud, který by článek zničil. Rovněž BMS chrání baterii před poškozením hlubokým vybitím. To nastává ve chvíli, kdy baterie je dlouhodoběji uskladněna (například přes zimu) pod určitým napětovým limitem. U Li-Ion článků se udává minimální nabití 40 % - 50 % kapacity baterie pro zabránění hlubokého vybití při dlouhodobém skladování. Dalším úkolem BMS je ochrana před přebitím. Li-Ion baterie nemají rády přebíjení, sice nejsou tak náchylné k vznícení či nafouknutí jako LiPo baterie, ale přebíjení výrazně snižuje jejich životnost. Li-Ion baterie mají podobně úzké optimální okno u kapacity, jako mají u použití při různých teplotách. Ideálně by využívaná kapacita této baterie měla být od 20 % do 80 %. Nabití nad 80 %, stejně jako vybití pod 20 % snižuje životnost baterie a v mnoha případech se jedná o výrazné snížení [36].

3.3 Dojezd

Dojezd elektrokola jsem zmiňoval již v úvodu této kapitoly. Jedná se o často uváděnou vlastnost kola, přestože je poměrně obtížné ho určit. Dojezd závisí na několika faktorech, jako je typ kola, váha celého systému, jak velkou výpomoc si uživatel žádá, jakou rychlostí jede, jaké převýšení se snaží zvládnout a jestli šlape naprázdno, či motoru pomáhá. Typ kola a rychlost také výrazně ovlivňují velikost odporu vzduchu, jak jsme si ukázali v předešlé kapitole. Také samozřejmě záleží na typu pneumatik, což jistě zná většina z nás z vlastní zkušenosti, neboť jízda na fat biku, či snow biku - tedy kole s širší pneumatikou a výraznějším vzorem - je rozdílná od jízdy na silničce, která se vyznačuje užší a hladkou pneumatikou.

Na internetu existuje několik on-line dojezdových kalkulaček. Hezky je vícero-faktorovost vidět například na kalkulačce od firmy BOSCH², která, poměrně logicky, funguje pouze pro výrobky od firmy BOSCH. Vidíme zde například, že pouze rozdíl mezi hladkým asfaltem a měkkou lesní cestou může způsobit rozdíl v dojezdu přes 50 %. Další podobně podrobnou kalkulačkou je kalkulačka od eBikeaholic³, která nejdříve určí přibližnou spotřebu, která se u elektromobility uvádí ve Wh/km, a poté vypočte očekávaný dojezd. Nejjednodušším způsobem, jak přijít na přibližný reálný dojezd elektrokola, je vydělit násobek napětí a kapacity baterie deseti. Deset Wh/km je totiž očekávatelná spotřeba průměrného jezdce, který používá 250W motor a jede normálním tempem, jaké vidíme na cyklostezkách u rekreačních jezdců.

Vzhledem k tomu, že dojezd je jedním z kritérií pro výběr elektrokola, se výrobci snaží uvádět co nejvyšší hodnoty - nejlépe dojezd přes 100 km. Třebaže je takový dojezd teoreticky dosažitelný u většiny baterií, lze ho dosáhnout jen s nejnižším stupněm pomoci, nebo jen s občasnou pomocí elektromotoru. Druhou možností, jak dosáhnout takového dojezdu, je použít větší (a tím i těžší) baterii. Například u baterie, která je použita v praktické části této práce, dodavatel udává reálný dojezd až 160km. To však bude platit pouze, pokud bude jezdec lehký, pojedje na silničce a na nejnižší stupeň pomoci.

¹System správy baterie *Battery management system*

²<https://www.bosch-ebike.com/en/service/range-assistant>

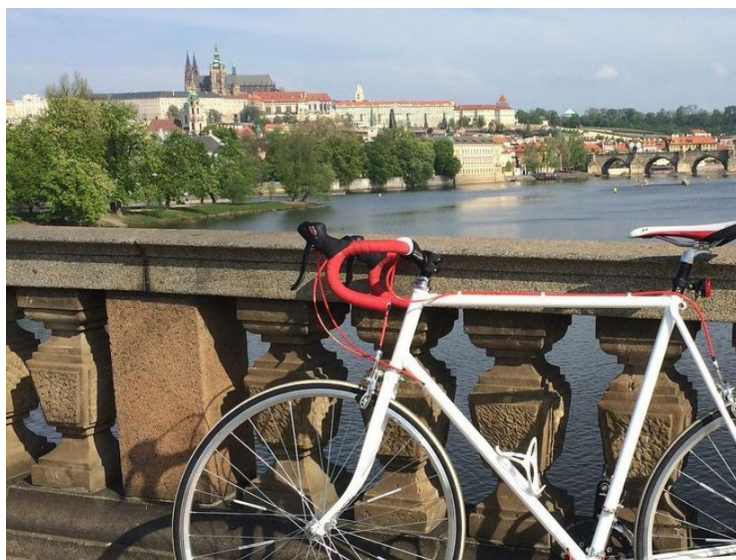
³<https://www.ebikeaholic.org/ebike-range-calculator>

Kapitola 4

Praktická část práce

V této části práce se zaměřím na praktický aspekt elektrokola, a to jeho stavbu a individualizaci. Se stále rostoucím zájmem o elektrokola se zvyšuje nabídka přestavbových souprav. U nich zákazník může očekávat, že celá souprava bude dohromady fungovat. Zákazník si však může také vybrat jednotlivé díly sám a občas metodou pokus-omyl či s pomocí vědomostí ostatních přicházet na to, co spolu funguje a co ne. Já jsem zvolil variantu již vytvořeného setu, jelikož jsem věděl, že některé části budu následně stejně nahrazovat a cenově sada vycházela levněji, než kupovat jednotlivé díly nezávisle na sobě.

Kolo, které jsem se rozhodl použít je renovované silniční kolo Favorit. Před elektrifikací byl nalakován rám, vyměněn střed, přehazovačka, ozubená kola, berany, sedlo, kliky, šlapky a kola. Úplně původní je tedy pouze rám.



Obrázek 4.1: Kolo před začátkem projektu

4.1 Požadované parametry a vlastnosti

Jelikož bicykl plánuji používat na cyklistických stezkách a veřejných komunikacích, jsem limitován motorem o maximálním trvalém výkonu 250 W, jak uvádí

nařízení Evropského parlamentu a Rady EU č. 168/2013. Jelikož legendární české silniční kolo Favorit těžko označíme jako kolo především k užití v terénu, nemůžu si dovolit mít vyšší výkon. Od kola požaduji minimální dojezd za ideálních podmínek 50 km na jedno nabití akumulátoru při normálním šlapání. Dále chci, aby všechny změny na kole byly vratné a bylo možné ho snadno uvést do původního neelektrifikovaného stavu. To vylučuje například vrtání do rámu kola. Hlavním cílem změn je zvýšit kvalitu a možnosti využívání kola.

4.2 Díly

Tato část se věnuje jednotlivým dílům, důvodům proč byly vybrány a jejich výhodám a nevýhodám oproti alternativám. Většinu dílů jsem nakoupil od firmy BP Lumen, která skládá kola pro značku Levit a v minulosti rovněž skládala kola pro značku Apache (do února roku 2021) [37]. Všechny mnou pořízené díly byly vyrobeny pro firmu Apache, která set prodávala na jejich stránkách¹. Za celý set tedy: motor s výpletem, ovladač na řídítka, brzdový snímač, řídicí jednotku, snímač šlapání, kotouč s magnety a dvěma kabely jsem utratil celkem 10.480Kč. Baterii společně s konektorem XT-60 (male) a 2A/42V nabíječkou jsem zakoupil v internetovém obchodě <https://www.evbike.cz/>, a to za 8.749 Kč. Toto je vše, co je v základu potřeba pro přestavbu kola na elektrokolo. Celkově mě přestavbový set vyšel 19.229 Kč.

4.2.1 Motor

Firma Apache v elektrosadách nabízí dva druhy nábojových motorů, verzi Basic a verzi Silent. Prodejce uvádí, že motor verze Silent je osazen Hallovými sondami a motor je tedy dle jejich slov *"poháněn proudem se sinusovým průběhem, což má za následek jeho výrazně nižší hlučnost a efektivnější využití energie a tím i vyšší dojezd na jedno nabití než u ekonomické verze BASIC"* [38]. Verze Basic je údajně poháněna proudem s obdélníkovým průběhem.

Z mnou pořízeného motoru vede 9 konektorů, které jsou nutné pro přívod proudu pro motor, Hallovy sondy a jejich výstup, což pro mě bylo zároveň i potvrzením, že se jedná o motor verze Silent. Ze štítku motoru na obrázku 4.2 lze vyčíst, že se jedná o 250W motor při 36 V. Motor vyrobila čínská firma Bafang, která je světovým leaderem v levnějších elektromotorech pro elektrokola. Na motoru je vyražen nápis 8FUN a směr otáčení.

¹<https://bplumen.cz/konfigurator.html>



Obrázek 4.2: Štítek motoru

4.2.2 Baterie

Baterie, kterou jsem použil, má napětí 36 V a kapacitu 15,6 Ah. Dle informací v instalačním manuálu se v baterii nachází 60 článků Li-ion typu 18650, které jsou zapojeny v sérii po deseti a takovýchto šest podmodulů je zapojeno paralelně. Takováto baterie by pak byla označována jako 6P10S. Trvalý vybíjecí proud baterie je 15 A, maximální vybíjecí proud je 20 A. Baterie je osazena BMS deskou, která vyrovnává napětí mezi články a chrání je před hlubokým vybitím. Tato ochrana nabíhá při napětí 29 V. Baterie by po 800 cyklech vybití ze 100 % na 50 % měla mít více jak 70 % své původní kapacity. Tato baterie uchovává energii 562 Wh, její dojezd by se tedy měl pohybovat okolo 56 km.

Proti vlivu okolí baterii chrání nylonový obal, který má na své vrchní a zadní straně velké pásky se suchým zipem. Ty slouží k přichycení baterie k rámu. Výrobce však doporučuje přidat pojistnou stahovací pásku. Vrchní část obalu je otvíratelná zipem. Překvapivě baterie nemá žádný otvor pro výstup vodičů, je jej tedy buď potřeba dodělat, nebo mít zip lehce pootevřený.



Obrázek 4.3: Baterie



Obrázek 4.4: Baterie v obalu

4.2.3 Řídicí jednotka a ovládání

Jako řídicí jednotku jsem využil controller for brushless motors, který byl součástí sady. Obal této řídicí jednotky tvoří hliníková krabička o rozměrech 94 mm x 50 mm x 28 mm. Je opatřena těsněními a o-kroužky, aby do ní nepronikla voda. Z jednotky vedou dva svazky kabelů, jeden svazek pro výkonovou elektroniku a druhý pro ostatní potřebná připojení. Celkově má jednotka 9 konektorů. Ve výkonovém svazku jsou 4 konektory, tři pro výstupy pro motor a jeden pro vstup baterie. Zbylými konektory jsou vstupy ze senzorů šlapání a Hallových sond, konektor pro světla a osmi žilový konektor pro komunikaci s jednotkou na řídítka, senzorem brzd a dalšími součástmi. Řídicí jednotka také obsahuje podpětovou ochranu, která vypíná kolo při poklesu napětí pod 31,5 V. Jednotka je navržena na stálý proudový odběr 7 A a maximální 14 A. Tím pádem je jednotka teoreticky schopna motoru dodávat stálých 252 W a maximálně 504 W. Baterie je schopna maximální proud řídicí jednotky dodávat trvale, což je jeden z faktorů, který jsem před nákupem kontroloval.



Obrázek 4.5: Řídicí jednotka



Obrázek 4.6: Ovladač na řídítka

Ovládání této řídicí jednotky probíhá pomocí ovladače, který se umísťuje na řídítka. Toto byl nejjednodušší ovladač, který se pro tento set prodává. Vybral jsem právě tento typ, jelikož jej v rámci této práce budu následně nahrazovat. Na ovladači jsou tři tlačítka: zapnout/vypnout, plus a minus. Ovladač má také 2 sloupce po pěti okénkách s LED diodami, jeden je ukazatelem napětí baterie a druhý ukazuje vybraný stupeň výpomoci (1-5). K řídicí jednotce je ovladač připojen pomocí pěti žilového kabelu.

4.2.4 Ostatní díly

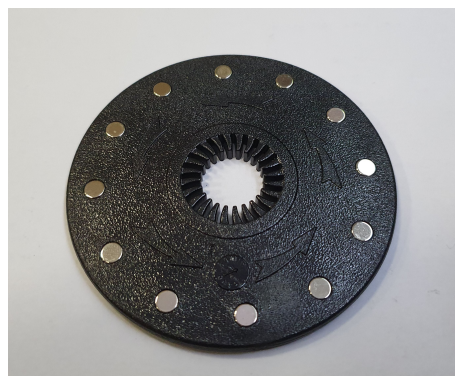
Další díly, které jsou součástí mnou zakoupeného setu, jsou senzor šlapání s kotoučem a brzdový senzor. Senzor šlapání je připevněn k plechové součástce, která ho drží u kotouče, který je osazen dvanácti magnety. Kotouč se točí společně s klikami kola. Senzor je v původním balení připraven k montáži na středovou osu. K setu bylo možné si přikoupit držák senzoru na sedlovou trubku, čehož jsem využil. Na těle senzoru se nachází také svítící dioda, která zobrazuje výstup senzoru. Ten je připojen přímo k řídicí jednotce pomocí tří žilového kabelu.

Místo tohoto typu zjišťování šlapání existuje také náhrada středu kola, která umí kromě kadence měřit i moment, který uživatel přes kliky převádí do řetězu. To otvírá další možnost řízení pomocí motoru. Motor v tomto případě pomáhá tak, aby

uživatel mohl používat stále stejný moment pro udržení nějaké rychlosti nezávisle na stoupání. Mimo to rovněž umožňuje měřit výkon, který uživatel do systému vkládá.



Obrázek 4.7: Senzor šlapání



Obrázek 4.8: Kotouč s magnety

Jelikož nedává smysl, aby motor pomáhal, pokud uživatel točí klikami a brzdí, jako by se například mohlo stát při čekání na zelenou, když si uživatel upravuje polohu klik, existuje senzor brzdění. Ten teoreticky není potřeba, ale dle mého názoru výrazně zvyšuje bezpečnost používání elektrokola. Existují tři možnosti jak zjistit, že uživatel brzdí. Lze buď vyměnit brzdící páčky za páčky osazené spínačem, podobně jak je to u některých motorek. Druhou možností, jak zjistit brzdění, je kontrola pohybu brzdícího lanka. Tuto metodu jsem byl nucen zvolit já, jelikož mé kolo je osazeno berany s brzdovými páčkami, ve kterých je integrováno ovládání přesmykače a přehazovačky bicyklu. Pro kola s hydraulickými brzdami se senzor v rámci této sady neprodává. Dále je možné pořídit senzor, který se přilepí na tělo brzdové páčky a hlídá, zda se magnet přilepený na páčce brzdy nepohnul, nicméně tato verze by také nešla použít v mém případě.



Obrázek 4.9: Senzor brzdění



Obrázek 4.10: Berany s brzdou

K setu se dají ještě přikoupit světla, která jsou ovládána řídicí jednotkou. Ty jsou dalším vylepšením, které se, společně s blinkry, dá přidat k základní výbavě elektrokola. Tento dodatek sám také v budoucnu zvažuji, nicméně jeho realizace by překročila rámeček této práce.

4.3 Sestavení setu

Při sestavování setu jsem postupoval podle instrukcí výrobce. Ty bohužel byly velmi střídme a občas zavádějící až chybné. Proto jsem kolo sestavoval až po přečtení několika fór a shlédnutí několika videí zveřejněných na Youtube věnujícím se sestavování jednotlivých součástí.

Jako první jsem přidělal kazetu na motor, to spočívalo v našroubování kazety na závit, který je na motoru. Kazetu jsem zvolil stejnou (Shimano 7 HG30 11-28z), jelikož jsem s ní byl spokojen na nemotorové verzi bicyklu. Díky tomu jsem nemusel poté tolik upravovat nastavení přehazovačky. Vzhledem k tomu, že jsem chtěl mít možnost rychle změnit elektrokolo zpět na jeho původní variantu - tedy normální jízdní kolo, použil jsem novou kazetu. Díky tomu jsem ji také nemusel demontovat z původního zadního kola. Jelikož sundání kazety vyžaduje speciální klíč, který se liší podle jednotlivých výrobců, bylo pro mě použití nové kazety nejjednodušší a nejpraktičtější volbou.

Další součástku, kterou jsem připevnil byl kotouč s magnety potřebný pro čtení otáčení klik. Ten se připevňuje mezi kliku od protilehlou přesmykače a střed kola. Přichycení klik k středu kola je několik. Kliky na mém kole jsou přichyceny pomocí šroubu s vnitřním šestihranem. Kliky je tímto šroubem tlačena proti zvětšujícímu se čtverci. Na demontáž je většinou potřeba speciální nástroj, který se zvládá zachytit za kliku a opřít se o střed, aniž by bránil stahování kliky. Jelikož jsem neměl k dispozici tento specializovaný stahovák, použil jsem stahovák na ložiska, který jsem zapřel o střed pomocí dvou na sobě postavených gola ořechů. Naštěstí se mi kliky podařilo sundat. Poté jsem musel zvětšit vnitřní průměr díry magnetického kotouče, aby se vešel na střed, ale aby zároveň neprokluzoval.



Obrázek 4.11: Dostavěné elektrokolo ze setu

4.3.1 Vystředění zadního kola

Kolo jsem zakoupil s již výpletem. Osadil jsem ho do zadní vidlice, nicméně výplet dodaný výrobcem nebyl připravený k okamžitému použití, jelikož byl téměř úplně povolený. Musel jsem jej pomocí centrovacího klíče utáhnout a vystředit. Vystředění spočívá v postupném utážení všech paprsků přibližně podobnou silou, aby

žádný z paprsků nebyl úplně volný. Je důležité zkontrolovat, zda je kolo vsazeno správně do výřezu ve vidlici.

Nyní následuje vystředění axiální, neboli do stran. Jelikož nemám k dispozici centrovací stolicí, celé vystředování jsem prováděl v zadní vidlici. K zjištění bočního pohybu lze využít čelistové brzdy nebo stahovací pásky, které se utáhnou kolem zadní či spodní vidlice a ustříhnou na rozumnou vzdálenost. Roztočíme kolo a postupně přibližujeme stahovací pásky, pokud možno rovnoměrně. Pásky přibližujeme, dokud neuslyšíme slabý škrtavý zvuk, poté se snažíme přibližně určit prostředek škrvání. Poté, co jsme našli prostředek, utáhneme paprsky na protější straně. Poté zkontrolujeme, zda se výchylka zmenšila. Tento proces jsem opakoval, dokud jsem nebyl spokojen s výsledkem. Pro normální používání kola je v pořádku výchylka 0,5mm na každou stranu. Bohužel ani té se mi nepodařilo dosáhnout, jelikož niple nebyly dostatečně kvalitní a i při správně velkém centrovacím klíči se začaly ničit [39].

Centrování kola ve směru radiálním, nahoru - dolu, neboli jak moc kolo vypadá jako vajíčko. Princip centrování je stejný, jen místo toho, abychom utáhli niple jen na jedné straně, utahujeme nejbližší lichý počet. Tedy, pokud páska škrta u dvou za sebou jdoucích paprscích, utáhneme buď jeden, nebo tři paprsky. Měli bychom také každé tři až čtyři radiální úpravy zkontrolovat, jak se změnila výchylky v axiálním směru. Dostatečné srovnání kola v radiálním směru je přibližně 1 mm. To ovšem záleží na typu kola. Více se nekruhovost projeví u silničních kol, jejichž pneumatiky jsou nahuštěné na vyšší tlak, než měkká horská kola. Toto vystředění se mi povedlo.

Dále je možnost kolo vystředit, aby nebylo do osmičky "jako přejeté". K tomu už je však potřeba speciální nástroj, který jsem k dispozici neměl. Proto jsem tuto kontrolu neprovedl. Ráfek jsem zkontroloval vizuálně, zda jsem jej někde nezničil, zda v něm nejsou ostré hrany a zda niple nevstupují do prostoru duše. Následně jsem do pláště vložil duši a společně navlékl na ráfek.

4.3.2 Upevnění motoru

Jelikož kolo s motorem se oproti normálnímu kolu samo od sebe točí, je potřeba vznikající moment přenést do rámu bicyklu. K tomu v našem případě slouží speciální podložka s nekrhovým otvorem pro přesun momentu z hřídele motoru do podložky a výstupkem, který se má zaklesnout do výřezu v zadní vidlici - viz obrázek 4.12. Jelikož můj motor většinu času bude pracovat pod 250 W, nemusím se moc obávat nějakého protočení nebo zničení vidlice. U silnějších motorů hrozí její otevření. Pro tyto motory je pak potřeba přidávat pomocnou páku, která se připevní k vidlici dále od osy kola a díky tomu má větší páku, tedy stačí menší síla pro udržení stejného momentu. Mám v plánu pravidelně kontrolovat zakončení vidlice a pokud bych zaznamenal zvětšování mezery, pomůžu přesunu momentu jinam.



Obrázek 4.12: Zakončení vidlice



Obrázek 4.13: Podložka s nekruhovým otvorem

4.3.3 Přidělení vodičů a zapojení konektorů

Tuto část sestavení setu jsem očekával bez problémů. Avšak popis prodejce "zapojte jednotlivé konektory, pasují do sebe pouze jedním způsobem" byl poměrně zavádějící, jelikož senzor šlapání má bílý 3 pinový konektor typu samec a na řídicí jednotce jsou dva samičí 3 pinové konektory, jeden černý a druhý bílý. Bohužel zapojení zde bylo nelogické a správná kombinace byla bílo-černá. Jelikož jsem nezměřil napětí po připojení baterie před připojením šlapacího senzoru, plné napětí baterie senzor, který očekával 5V, zničilo s kouřovým i akustickým efektem. Po nahrazení senzoru a připojení na správný konektor jsem připojil všechny ostatní kabely, již bez dalších nepříjemných překvapení.

Pro připojení baterie k řídicí jednotce jsem odstranil banánkové konektory, kterými je řídicí jednotka originálně osazena. Nahradil jsem je samčím konektorem typu XT-60, který jsem objednal společně s baterií. Všechny vodiče, které vedly po kole, jsem ke kolu připevnil pomocí stahovacích pásek.



Obrázek 4.14: Konektor XT-60

Senzor brzdění jsem připevnil těsně před zadní čelistové brzdy, jelikož zde bylo brzdové lanko bez ochranného bovdeny. Normálně se senzor umísťuje na přední brzdu. Aby senzor fungoval, je potřeba brzdové lanko jím provléct. Kvůli tomu jsem musel rozebrat zadní brzdu, kterou jsem poté opětovně sestavil a seřídil.

Baterii jsem umístil do jejího ochranného obalu a řídicí jednotku jsem připevnil pomocí stahovacích pásek mezi zadní vidlici a sedlovou trubku. Bateriový obal jsem s baterií přidělal na horní rámovou trubku a sedlovou trubku. Jelikož se brzdový senzor normálně umísťuje na přední brzdu, je k tomu uzpůsoben kabel, ve kterém se potkávají signály z ovladače, brzdového/brzdových senzorů popřípadě akcelerační páčky. Umístění mého brzdového snímače mi poté neumožňovalo umístění ovladače na řídítkách, umístil jsem jej proto na horní rámovou trubku, kde jej držela průhledná lepicí páska. Toto provizorní řešení mi však nevadilo, jelikož ovladač budu celkově nahrazovat.

4.3.4 Testování setu

Kolo jsem se rozhodl otestovat na trase Strahov-Dejvice-Strahov a Strahov-Staroměstské náměstí-Strahov. Tento trasy jsem vybral kvůli jejich kopcovitosti a jelikož jsem je několikrát jel před touto přestavbou. Kolo se chovalo podobně jako jiná elektrokola, která jsem v minulosti zkoušel. Rozjezdy na kole jsou výrazně pohodlnější a uživatel si může dovolit mít zařazený vyšší, tedy "těžší" stupeň, jelikož motor má dostatečný točivý moment, aby jezdce skoro vystřelil, když padne zelená. Jediné dva problémy, které jsem zaznamenal při jízdě, bylo posouvání celé řídicí jednotky směrem dolů a špatně spájený konektor baterie a řídicí jednotky, ze kterého vypadal jeden vodič což způsobovalo vypnutí celého systému elektromotoru a kvůli tomu se kolo vypínalo. Oba tyto problémy jsem po testovacích jízdách vyřešil lepším uchycením řídicí jednotky a opravou připojení konektoru.

4.4 Ovládání kola pomocí mobilní aplikace

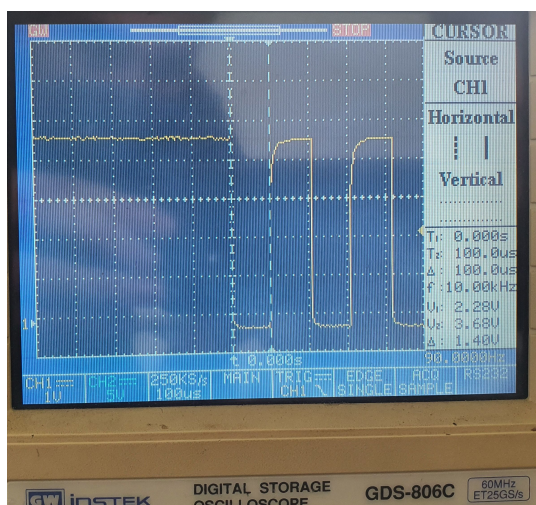
Abych udělal pro tuto práci něco více, než sestavení elektrokola ze sady, rozhodl jsem se plně nahradit ovladač na řídítka, ovládáním pomocí mobilního telefonu s mnou vytvořenou aplikací. Dle zadání pro tuto práci jsem měl vytvořit aplikaci, která bude zobrazovat vybrané informace o pohonu a jízdě. Tato změna mi umožní do budoucna kolo vylepšovat a zpříjemnit jeho používání, či zobrazovat zajímavé údaje o jízdě, které ani komerční řešení nenabízejí, jako například množství proudu procházejícího systémem.

Pro vytvoření všech funkcí, které řídicí jednotka poskytuje a více, jsem se rozhodl kolo přetvořit pomocí vývojové desky Arduino, tedy konkrétně jejího klonu. Toto relativně levné řešení mi umožňuje velké množství věcí, kterých mohu dosáhnout. Pro měření jsem používal multimetr a osciloskop. Dále jsem také použil pájku, horkovzdušnou pistoli a tavnou pistoli. Pro výrobu obalů jsem využil 3D tiskárny.

4.4.1 Komunikace

Na to, abych mohl nahradit ovladač, jsem musel nejdříve zjistit, jak s řídicí jednotkou komunikuje. Výrobce bohužel neuvádí, jak spolu jednotlivé součásti systému komunikují. Po odizolování ochranné venkovní izolace jsem objevil pět vodičů, které jsem identifikoval jako: černý vodič-zem, červený, modrý-napětí baterie, žlutý a zelený-komunikace. Pomocí procházení fór na internetu jsem postupně přišel na

to, že se jedná o UART² komunikaci. To je komunikace, kterou arduino používá při komunikaci s počítačem a existuje pro ni celá knihovna Serial, která je standardní součástí vývojového prostředí Arduino IDE. Komunikace je asynchronní, to znamená že přijímač i vysílač mají vlastní generátor hodinového signálu [40]. Na to, aby si jednotlivá zařízení rozuměla, se používá přenosová rychlost (anglicky baud rate), lze si jí všimnout i například v sériovém monitoru Arduino IDE vpravo dole. Dle databáze Národní knihovny je baud "jednotka modulační rychlosti přenosu dat v asynchronním komunikačním kanále, zkratka Bd. Uvádí počet změn signálu za sekundu" [41]. S využitím osciloskopu, jehož měření je vidět na obrázku 4.15, jsem zjistil že komunikace potřebuje pro přesun jednoho bitu přibližně 100 mikrosekund. Tato doba přibližně odpovídá 9600 baudů, viz 4.1.



Obrázek 4.15: Měření osciloskopem

To odvozujeme z toho, že doba pro přenos jednoho bitu je rovna převrácené hodnotě přenosové rychlosti. Tedy:

$$\text{doba přenosu bitu} = \frac{1}{\text{baudrate}} = \frac{1}{9600} = 104.17\mu\text{s} \quad (4.1)$$

Hodnoty přenosové rychlosti jsou relativně dané, aby byla jednodušší komunikace mezi zařízeními. Arduino Uno například podporuje 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600, 14400, 19200, 28800, 31250, 38400, 57600 a 115200 baudů. Hodnota 9600 je relativně standardní pro přesuny středního množství dat. Z několika fór jsem vyčetl, že různá elektrokola používají různé rychlosti přenosu. Toto byl důvod, proč jsem musel provést měření.

Na základě toho zjištění jsem byl schopen odposlouchávat komunikaci mezi řídicí jednotkou a ovladačem. Abych mohl odposlouchávat zařízení, vložil jsem odizolované vodiče společně s vodiči k Arduino do svorkovnice. Následně jsem napsal kód, který zaznamenával komunikaci, kterou lze nalézt v tabulce 4.1

²Počítačová sběrnice sloužící k asynchronnímu sériovému přenosu dat *Universal asynchronous receiver transmitter*

z hmi do kontroleru (žlutý vodič)														
číslo bajtu	0	1	2	3	4	5	6	7	8					POPIS
zpráva	55	0	19	F	1A	1C	88	2B	D					nulová asistence
	55	1	19	F	1A	1C	88	2C	D					1.L asistence
	55	3	19	F	1A	1C	88	2E	D					2.L asistence
	55	5	19	F	1A	1C	88	30	D					3.L asistence
	55	7	19	F	1A	1C	88	32	D					4.L asistence
	55	9	19	F	1A	1C	88	34	D					5.L asistence
	55	10	19	F	1A	1C	88	3B	D					nulová asistence+světla
	55	F	19	F	1A	1C	88	3A	D					“pomoc do kopce”
z kontroleru do hmi (zelený vodič)														
číslo bajtu	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	POPIS
zpráva	55	0	0	0	0	2	0	0	0	0	55	2	D	motor se netočí
	55	0	0	0	0	4	0	0	0	0	55	4	D	motor se točí

Tabulka 4.1: Komunikace HMI a řídicí jednotky

Komunikací HMI a kontroleru se zabývá několik internetových fór. Bohužel jsem však nenašel fórum s údaji o komunikaci, která by se podobala té mnou naměřené. Komunita elektrokolových kutilů napsala opensource program, kterým lze nahradit firmware v programovatelných kontrolerech pro motory Bafang. Mnou použitý kontroler však není programovatelný. A komunikace z tohoto programu neodpovídala té, kterou jsem naměřil. Z tohoto důvodu jsem nemohl odvodit, co přesně znamená jednotlivý bajt.

Byl jsem tedy nucen použít reverzního inženýrství, a postupně měnit vstupy a pozorovat výstupy. Z této černé skřínky jsem pak odvodil, co některé poslané znaky znamenají. Zařízení komunikují v hexadecimální soustavě s čísly 00 až FF. To vychází jeden bajt na dva znaky. Druhý odesílaný bajt HMI pro řídicí jednotku, tedy bajt s číslem 1 říká řídicí jednotce, jak moc má pomáhat a zda mají být zapnutá světla. Možné pomoci jsou: 00 pro žádnou pomoc motorem, 09 pro maximální pomoc a 01, 03, 05, 07 pro pomoc mezi. Pokud je k tomuto číslu přičtena dekadická 16 tedy hexadecimální 10, je zároveň požadavek na světla. Bajty číslo 2 až 6 se nemění. Bajt číslo 7 je suma bajtů zprávy, tedy kontrola, zda všechny bajty přišly v pořádku. První a poslední bajt jsou nejspíše označení začátku a konce zprávy, v průběhu mého měření se neměnily.

Zpráva odesílaná z řídicí jednotky do HMI je velmi jednoduchá. Začíná a končí stejným bajtem, jaký jsem naměřil v komunikaci druhým směrem. Ve zbytku zprávy se mění pouze bajty číslo 5 a 11. Pátý bajt vrací HMI 02, když se motor netočí a 04, když ano. Jedenáctý bajt je pak znovu kontrolní sumou. Jinak jsem nezaznamenal žádnou změnu bajtů.

Také jsem měřil jiné elektrokolo stejné značky. U něj posílané zprávy vypadaly skoro totožně. Rozdíl byly pouze v bajtech číslo 3, 4 a 6 kde místo 0F bylo 8C, místo 1A 19 a místo 88 87. Tedy i kontrolní suma byla jiná.

4.4.2 Programování

Díky tomu, že nyní vím, co pro mne relevantní části zpráv vyjadřují, jsem schopen napsat kód, který nahradí ovladač na řídicích a zjistí některé zajímavé informace o systému, jako jsou například rychlost bicyklu, napětí baterie a přiváděný

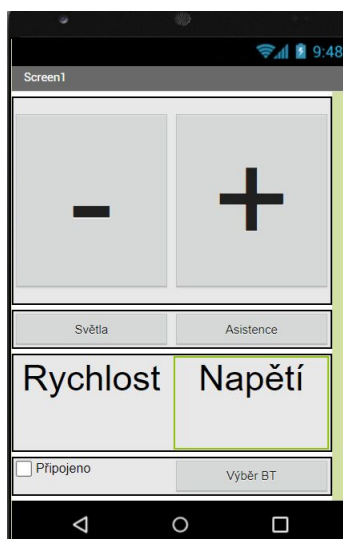
proud do systému. Pro prototypování jsem využil vývojové desky Arduino Uno, jelikož má dostatečný počet vstupních a výstupních pinů a lze ji nahradit výrazně menší deskou Arduino Nano, které má stejný procesor i paměť, ale méně pohodlně se s ní pracuje. Kód pro desku jsem psal v opensourcovém programu Arduino IDE 1.8.19, které umožňuje desky programovat v jazyku C a C++.

Kód, který je v příloze této práce, obsahuje tabulku odesílaných zpráv. Z té pak podle požadované výpomoci vybírá zprávu, kterou v pravidelných intervalech odesílá. Tato zpráva je modifikována v případě, že je požadavek zapnutí světel. Také telefonu pravidelně vrací naměřená data rychlosti a napětí (v budoucnu i proudu).

Arduina Uno i Nano mají pouze jeden hardwarový sériový port, tedy umožňují pouze jednu sériovou komunikaci. Naštěstí existuje knihovna Software Serial, které jsem využil pro komunikaci s bluetooth modulem, pomocí kterého komunikuje Arduino s mobilním telefonem. Hardwarový port využívám pro komunikaci Arduina s kontrolerem. Pro měření rychlosti jsem použil schopnosti druhého a třetího pinu, přerušování. Pokud se na druhém pinu změní napětí z logické nuly na jedničku provede se jednoduchá krátká funkce, která na moment přerušuje hlavní loop funkci.

Aplikace pro mobilní telefon

Aplikaci pro mobilní zařízení jsem vytvořil pomocí blokového programovacího webového klienta App Inventor 2 od MIT. Aplikaci jsem se rozhodl napsat pro operační systém Android, jelikož většina uživatelů, kteří kdy mé kolo budou používat, vlastní mobilní telefon právě s tímto operačním systémem. Pro komunikaci jsem využil vestavěného bluetooth modulu, jelikož při připojení Arduina pomocí OTG čtečky nelze zároveň zařízení nabíjet a posílat data. Mobil by se mi tedy při jízdě vybíjel výrazně rychleji, než při použití bluetooth. Další výhodou použití bluetooth je ta, že kolo lze ovládat i ze vzdálenosti 5 metrů a hlavně je volný port, který využiji k nabíjení telefonu z baterie elektrokola. Telefon poté budu například moci používat pro navigaci a nehrozí vybití během jízdy.



Obrázek 4.16: Aplikace mobilu

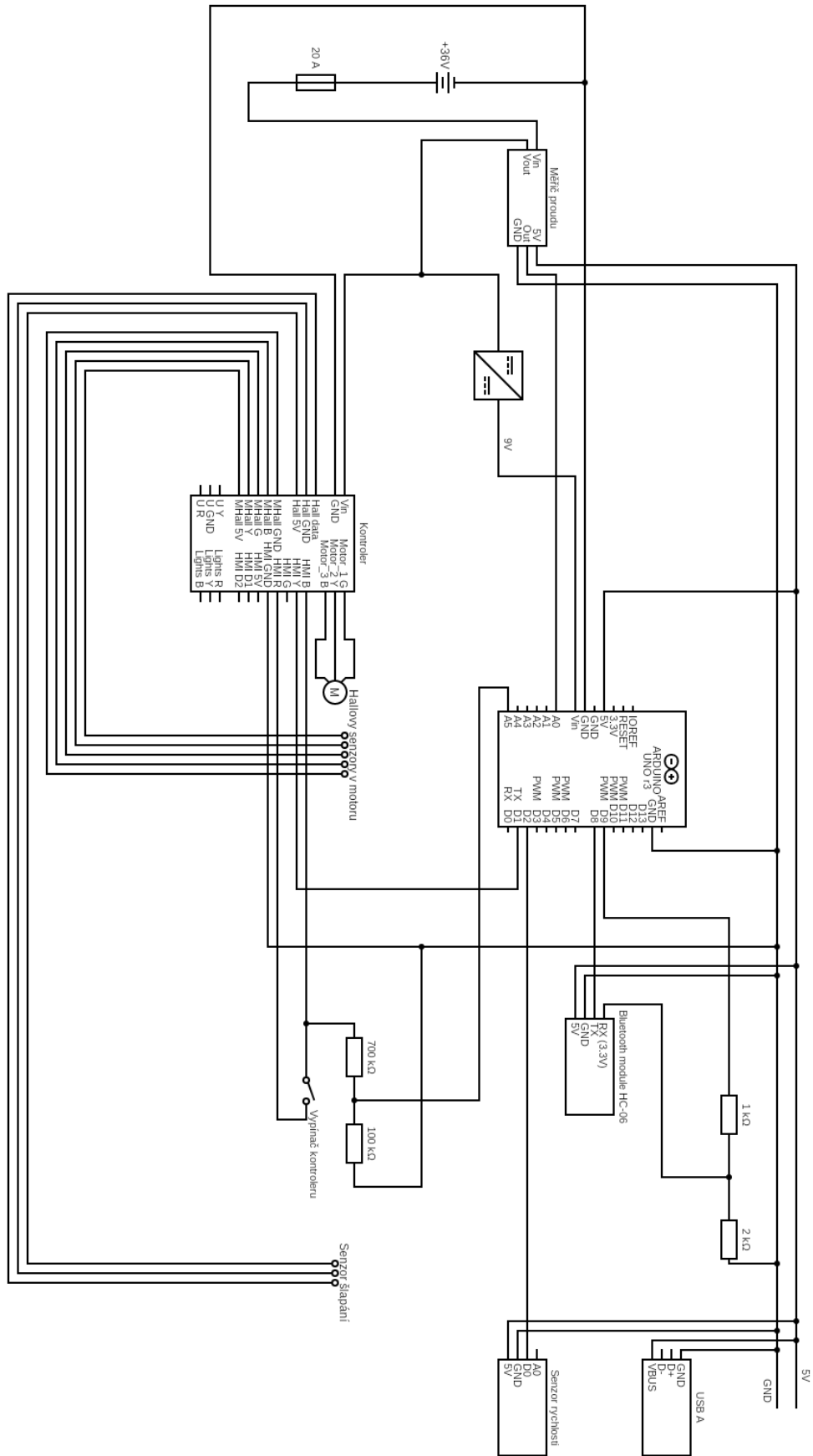
Aplikace má jednoduché ovládání čtyřmi tlačítky, které mají přiřazené chování jak na krátký stisk, tak i na dlouhý. Dále aplikace momentálně ukazuje dvě čísla, a

to rychlost a napětí baterie. Je zde také možné dodat několik informací, jako jsou například počet najetých kilometrů, ať už celkových či uživatelem vynulovatelných. Dále plánuji přidat ukazatel odebíraného proudu a z něj odvodit aktuální výkon motoru.

Prvním tlačítkem se znakem mínus se ubere úroveň pomoci motoru. Při delším stlačení se pomoc úplně vypne. Po stlačení druhého tlačítka se znakem plus se pomoc zvýší o jedna, při delším stisku je pak pomoc nastavena na maximum. Tedy pro maximální navýšení pomoci uživatel není nucen mačkat pětkrát stejné tlačítko, jak tomu bylo u původního ovladače na řídicích. V druhé řadě je ovladač světel, který funguje, ale prozatím není využíván. Dále zde nalezneme tlačítko "Asistence", které pošle požadavek pro asistenci. Ten je zpracován při pouze při nulové pomoci a v rychlostech do 5km/h. Dále se při připojení mobilu k Arduino zobrazuje rychlost, napětí baterie a zda je mobil připojen. Tlačítkem "výběr BT" uživatel na začátku každé jízdy vybere zařízení, ke kterému se chce připojit. Zde je nutné vybrat bluetooth modul kola.

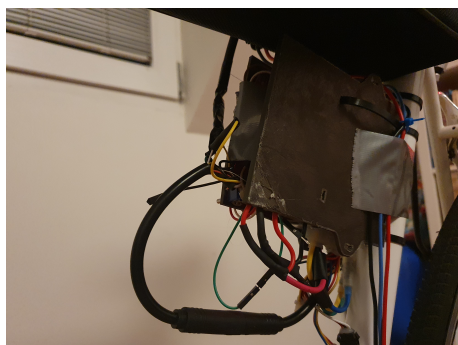
4.5 Další úpravy

Součásti i motor jsem skládal mimo rám kola, kvůli úspoře místa. Motor jsem přichytil pomocí upravených úhelníků, které jsem vruty připevnil k fošnám pro zavěšení kola, aby se mohlo točit. Úhelníky bylo potřeba provrtat, aby jimi prošla závitová tyč osy motoru. Pro správnou funkci bluetooth modulu HC-06 bylo potřeba použít pro RX pin napětového děliče, aby napětí nepřekročilo 3.3 V. Přes další napětový dělič jsem také připojil snížené napětí do Arduino, abych jej mohl měřit a tím určovat stav nabití baterie. Pro měření rychlosti jsem nejdříve uvažoval nad napojením se na výstupy Halloových sond. Po jejich připojení k Arduino jsem zjistil, že kvůli přítomnosti volnoběžné spojky fungují pouze při otáčení motoru. Z tohoto důvodu jsem musel použít externí senzor rychlosti, jinak bych získával data o rychlosti pouze při chodu motoru. Dále jsem zapojil senzor proudu. Vše jsem zapojil podle schématu na obrázku 4.17. V tomto diagramu je také viditelný DC/DC - měnič, který slouží k přeměně napětí baterie na napětí vhodné pro napájení Arduino, tedy 7 V až 12 V. Oproti původnímu systému se kontroler zapíná pomocí dvoupolohového páčkového spínače.



Obrázek 4.17: Schéma zapojení při testování

Vše jsem připevnil ke kolu pomocí 3D tištěných dílů, které si lze prohlédnout v příloze práce, a stahovacích pásek. Všechny držáky jsem vymodeloval v programu Autodesk Inventor. Ke slicování jsem využil open-sourcový PrusaSlicer. Obal pro senzor rychlosti se skládá ze dvou částí. Spodní část se přichytává na kolo pomocí dvoustrannné lepicí pásky a stahovací pásky, která je prostrčena skrz díl, jehož horní strana je negativem pájené destičky senzoru. Ten tedy sedí v obalu, ve kterém ho dodatečně přidržuje tavné lepidlo. To také přilepuje vrchní část, která má v přední části poloviční stěnu, kvůli lepšímu zaznamenání průchodu magnetického pole kolem senzoru. Tavným lepidlem jsem také uzavřel výstupní piny modulu, ke kterým jsem připájel vodiče pro připojení k Arduino. Celý obal na senzor je tedy voděodolný. Jedinou vadou tohoto designu je absence výstupku a prohlubně, které by pomohly obě části do sebe zaklesnout.

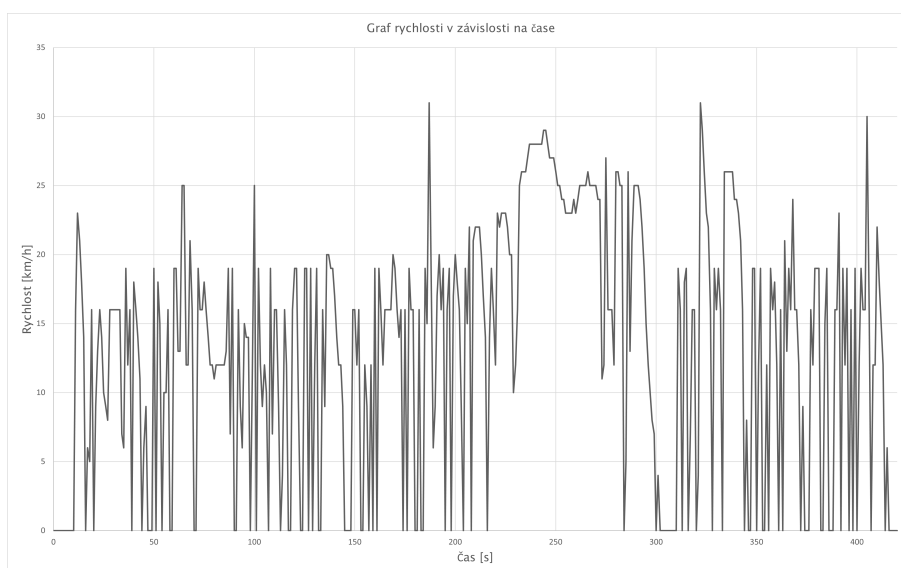
**Obrázek 4.18:** Obal hlavního systému**Obrázek 4.19:** Obal pro senzor rychlosti

Obal pro řídicí jednotku, Arduino Nano, bluetooth modul HC-06 a USB port se také skládá ze dvou kusů. Řídicí jednotka používá MOSFET tranzistory pro ovládání motoru, které jsou připevněné teplovodivou pastou k hliníkovému obalu. Je tedy potřeba umožnit přístup vzduchu k jednotce. Proto jsem ji přichytil stahovacími pásky a minimální plochou obalu. Místa pro ostatní součástky jsem rozložil podle jejich propojení, abych minimalizoval délku kabelů. Další snahou bylo udržet možnost jednoduché výměny jednotlivých součástí při jejich poruše či výměně za novější.

**Obrázek 4.20:** Dostavěné elektrokolo

4.6 Testování vylepšeného kola

Kolo jsem otestoval na stejné trase jako při předchozím testu. Tedy ze Strahova do Dejvic a zpět a ze Strahova do centra a zpět. Při zkušebních cestách jsem byl mile překvapen absencí výpadků připojení mobilu ke kolu. Bohužel se po několika kilometrech uvolnilo čidlo měření rychlosti, jehož obal jsem musel následně upravit. Při testování jsem objevil, že mobilní telefony, i když jsou vodotěsné, špatně reagují na silný déšť. Voda se naštěstí nedostala k elektronice, ale kolo bylo skoro nemožné ovládat. Na obrázku 4.21 si je možné prohlédnout závislost rychlosti na čase z kratšího testování v okolí kampusu ČVUT. Tyto data jsou tvořeny a ukládány v mobilním telefonu. Aby aplikace nevytvářela velké množství dat, ukládá rychlost pouze každou vteřinu. Při přenosu dat docházelo pravidelně k chybě, kdy mobilní aplikace ukazovala rychlost 0 km/h při jízdě. Z tohoto důvodu je v grafu tolik bodů s rychlostí 0 km/h.



Obrázek 4.21: Graf rychlosti v závislosti na čase

4.7 Plánovaná vylepšení

Když už mám ke kolu připevněn programovatelný mikročip, byla by škoda jej nevyužít k dalším vylepšením kola. Dalším plánovaným upgradem jsou světla a blinkry. Se světly není moc co nového vymýšlet, zato programovatelné led pásy, které se nyní dají pořídit relativně levně, umožňují zajímavé animace blinkrů a zároveň je lze využít i jako zadní červené světlo s možným blikajícím zvýrazněním při brzdění. To je možné detekovat napojením se na výstup brzdového senzoru, který je již na kole tak jako tak připevněn.

Další úpravou, kterou plánuji provést, je připevnit k řídkám odnímatelný display s tlačítky a přepínačem, který by umožnil ovládat kolo i bez aplikace v mobilním telefonu. Toto by mohla být alternativa pro vlastníky telefonu s operačním systémem iOS nebo Windows Phone. Display by pak mohl ukazovat na měnících se

obrazovkách všechny zajímavé údaje. Zároveň by toto řešení mohlo sloužit jako nouzové ovládání elektrokola, například při silných deštích nebo po pádu kola a rozbití telefonu.

Závěr

Bakalářská práce se zabývá přestavbou jízdního kola Favorit na elektrokolo. V teoretické části jsou definované základní pojmy a popsány součástky, které jsou pro přestavbu nutné. První kapitola se zabývá samotnými elektrokoly, popisuje jednotlivé typy a přibližuje pojem elektrokolo v české legislativě. Další kapitola se zabývá motory, které jsou jednou z nejdůležitějších součástí elektrokola. Popisuje základní rozdělení, konstrukce či řízení a uvádí typy ztrát, ke kterým může docházet. Na ní úzce navazuje kapitola o bateriích, která rovněž osvětluje jednotlivé typy a jejich výhody a nevýhody, dále se věnuje umístění baterie na kole a péči o ni. Krátce také zmiňuje dojezd jako kritérium podle kterého jsou často vybírány baterie a uvádí ho na pravou míru.

V praktické části se práce věnuje samotné přestavbě jízdního kola na elektrické. Nejprve popisuje požadavky, které jsou na hotové kolo kladeny a v souladu s těmito požadavky představuje jednotlivé díly a jejich charakteristiky. Také jsou v práci vylíčeny všechny důležité postupy při skládání elektrokola ze zakoupeného setu. V podkapitole o vylepšení elektrokola je vysvětlen způsob komunikace HMI a řídicí jednotky. Pomocí toho, že je znám způsob komunikace, bylo poté umožněno přesunout celé ovládání do mobilního telefonu. Dále se v práci píše o sestavení a upevnění vytvořeného systému. Práci uzavírá testování navrženého systému a nabízí možné budoucí vylepšení.

V příloze práce se nacházejí kódy, které byly pro tuto práci napsány, společně s fotogalerií navržených obalů a součástí.

Bibliografie

1. PRAHOU, Čistou stopou. Praha zažívá boom cyklistiky. 2020. Dostupné také z: [web] [cit. 2. 1. 2021] <https://www.cistoustopou.cz/kolo/clanek/praha-zaziva-boom-cyklistiky-1510>.
2. NĚMEC, Jan. KOLA SE V BŘEZNU PRODÁVALA O 420 % VÍCE NEŽ VLONI, HEUREKA ZVEŘEJNILA STATISTIKY. 2021. Dostupné také z: [web] [cit. 12. 12. 2021] <https://mtbs.cz/clanek/kola-se-v-breznu-prodavala-o-420-vice-nez-vloni-heureka-zverejnila-statistiky/kategorie/ostatni#.YgDnk0qZ03A>.
3. ŠNOBR, Martin. Sdílená elektrokola opět v Praze. Přiváží je dvě firmy najednou: Bolt a Lime. 2020. Dostupné také z: [web] [cit. 2. 1. 2021] <https://prahounakole.cz/2020/10/sdilena-elektrokola-opet-v-praze-privazi-je-rovnou-dve-firmy-najednou/>.
4. KOVÁŘÍKOVÁ, Zdeňka. Praha zažívá boom cyklistiky. 2020. Dostupné také z: [web] [cit. 2. 1. 2021] https://ekolist.cz/cz/publicistika/rozhovory/prazske-ulice-jsou-konstruovany-na-objem-automobilove-dopravy-o-20-nizsi-rika-adam-scheinherr?fbclid=IwAR2MG2p0yKCKDi4skX5Qe-T0J9Ek75F0xdZQ3JXs_OrQ0uzI63Bhjl-430s.
5. FÍŠER, Adam. Praha to myslí s mýtem za vjezd do města vážně. Chce se zbavit aut v ulicích a zvýhodňovat MHD. 2020. Dostupné také z: [web] [cit. 2. 1. 2021] <https://www.autosalon.tv/novinky/ridicuv-chleba/praha-se-potrebuje-zbavit-aut-v-ulicich-urednici-vidi-myto-jako-reseni>.
6. PRAHY MAGISTRÁT, hlavního města. *Život obyvatel a návštěvníků metropole*. 2020. Dostupné také z: [web] [cit. 2. 1. 2021] <https://poladprahu.cz/co-se-zlepsi/>.
7. NAŘÍZENÍ EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (EU) č. 168/2013: o schvalování dvoukolových nebo tříkolových vozidel a čtyřkolek a dozoru nad trhem s těmito vozidly. *Úřední věstník Evropské unie*. 2013, roč. 60, č. 1, s. 52–128. Dostupné také z: [web] [cit. 12. 12. 2021] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32013R0168&from=SV>.
8. AZUB. *azub-max-700-recumbent-highracer-main-2400px.jpg*. 2020. Dostupné také z: [web] [Foto] <https://azub.eu/wp-content/uploads/2019/10/azub-max-700-recumbent-highracer-main-2400px.jpg>.
9. AZUB. *ti-fly-x-recumbent-trike-photo1.jpg*. 2020. Dostupné také z: [web] [Foto] <https://azub.eu/wp-content/uploads/2018/02/ti-fly-x-recumbent-trike-photo1.jpg>.

10. LEMIRE-ELMORE, Justin. *The Energy Cost of Electric and Human-Powered Bicycles*. 2004. Tech. zpr. The University of British Columbia. Dostupné také z: [web] [cit. 2. 1. 2021] https://ebikes.ca/documents/Ebike_Energy.pdf.
11. TISKOVÁ, zpráva. *ABB motor sets world record in energy efficiency – saves half a million dollars*. 2017. Dostupné také z: [web] [cit. 2. 1. 2021] <https://new.abb.com/news/detail/1789/ABB-motor-sets-world-record-in-energy-efficiency-saves-half-a-million-dollars>.
12. ZARMA, Tahir Aja; GALADIMA, Ahmadu Adamu; AMINU, Maruf A. Review of Motors for Electrical Vehicles. *Journal of Scientific Research and Reports*. 2019, roč. 24, č. 6, s. 1–6. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.9734/jsrr/2019/v24i630170>.
13. Once again NASA relies on maxon technology. 2017. Dostupné také z: [web] [cit. 2. 1. 2021] <https://www.maxongroup.com/maxon/view/news/Once-again-NASA-relies-on-maxon-technology>.
14. MATHEW, Sabin. *Working synchronous motor.jpg*. 2014. Dostupné také z: [web] [Foto] [cit. 2. 1. 2021] https://learnengineering.org/Synchronous-motor/working_synchronous_motor.jpg.
15. ŠIMON, Ing. Josef. BLDC aneb DC motor s nulovými náklady na údržbu. *Elektro*. 2011, roč. 10, s. 13–14. Dostupné také z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/bldc-aneb-dc-motor-s-nulovymi-naklady-na-udrzbu--10016>.
16. RUOHO, Sami; KOLEHMAINEN, Jere; IKAHEIMO, Jouni; ARKKIO, Antero. Interdependence of Demagnetization, Loading, and Temperature Rise in a Permanent-Magnet Synchronous Motor. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2010, roč. 46, č. 3, s. 949–953. Dostupné z DOI: 10.1109/TMAG.2009.2033592.
17. LEMIRE-ELMORE, Justin. power-ratings. 2021. Dostupné také z: [web] [%C4%8D1%C3%A1nek] [cit. 12. 12. 2021] <https://ebikes.ca/learn/power-ratings.html>.
18. *H17eb21928073463da6dc61be4937b59dt.jpg*. 2021. Dostupné také z: [web] [Foto] [cit. 12. 12. 2021] <https://ae01.alicdn.com/kf/H17eb21928073463da6dc61be4937b59.jpg?width=760&height=722&hash=1482>.
19. BURNEY, Alec. *photo-3-1.jpg-nggid03704-ngg0dyn-320x240x100-00f0w010c010r110f110r010*. 2021. Dostupné také z: [web] [Foto] [cit. 12. 12. 2021] <https://electricbikereport.com/wp-content/gallery/direct-drive-vs-geared-hub-motors/cache/photo-3-1.jpg-nggid03704-ngg0dyn-320x240x100-00f0w010c010r110f110r010t010.jpg>.
20. W, Alex. *23389157969_f4dc48d2b0_c*. 2021. Dostupné také z: [web] [Foto] [cit. 12. 12. 2021] https://c2.staticflickr.com/6/5830/23389157969_f4dc48d2b0_c.jpg.
21. W, Alex. *23648609022_2c38fedef7_c*. 2021. Dostupné také z: [web] [Foto] [cit. 12. 12. 2021] https://c2.staticflickr.com/6/5745/23648609022_2c38fedef7_c.jpg.
22. *HTB1zk3EQFXXXXX4XXXXq6xXFXXX1*. 2021. Dostupné také z: [web] [Foto] [cit. 12. 12. 2021] https://sc01.alicdn.com/kf/HTB1zk3EQFXXXXX4XXXXq6xXFXXX1/225658508/HTB1zk3EQFXXXXX4XXXXq6xXFXXX1.jpg_.webp.

23. YEDAMALE, Padmaraja. 2021. Dostupné také z: [web] [cit. 12. 12. 2021] <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00885a.pdf>.
24. STEJSKAL, Martin. *Návrh měniče pro BLDC motor*. 2017. Dipl. Ústav automatizace a měřicí techniky, Vysoké učení technické v Brně.
25. OGGIANO, Luca; LEIRDAL, Stig; SÆTRAN, Lars; ETTEMA, Gertjan. Aerodynamic optimization and energy saving of cycling postures for international elite level cyclists. *Eng. Sport*. 2008, roč. 7, č. 1, s. 597–604.
26. MUNSON, BR; YOUNG, DF; OKIISHI, TH. *Fundamentals of fluid mechanics vol. 3*. Wiley, 1998.
27. KYLE, Chester; BERTO, Frank. HUMAN POWER. *Human Power*. 2001, č. 52, s. 3–11.
28. *Elektrické teplo*. 2021. Dostupné také z: [web] [cit. 12. 12. 2021] <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/430>.
29. ZHANG, Qun; CEN, Song (ed.). 1 - The physics models. In: *Multiphysics Modeling*. Oxford: Academic Press, 2016, s. 1–96. Elsevier and Tsinghua University Press Computational Mechanics Series. ISBN 978-0-12-407709-6. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407709-6.00001-8>.
30. SPECIALIZED. *09-98020-31-KENEVO-EXPERT-6FATTzE-SGEGRN-SPR-HERO.jpg*. 2020. Dostupné také z: [web] [Foto] [cit. 2. 1. 2021] <https://www.specialized.com/medias/09-98020-31-KENEVO-EXPERT-6FATTzE-SGEGRN-SPR-HERO.jpg?context=bWFzdGVyfGl1YWdlc3w1MDkyMjB8aW1hZ2UvanBlZ3xpbWFnZXMvaG>
31. COBOC. *azub-max-700-recumbent-highracer-main-2400px.jpg*. 2020. Dostupné také z: [web] [Foto] [cit. 2. 1. 2021] https://www.coboc.biz/content/uploads/2020/09/2020_Torino-527_side.png.
32. AGWU, D; OPARA, F; CHUKWUCHEKWA, N; DIKE, D; UZOECHI, L. Review of Comparative Battery Energy Storage System (BESS) for Energy Storage Applications in Tropical Environment. In: *IEEE 3rd International Conference on Electro-Technology for National Development*. 2017.
33. SCROSATI, Bruno. *Lithium Batteries : Advanced Technologies and Applications*. Hoboken: Wiley, 2013. ISBN 978-1-118-18365-6.
34. DITRICH, Jakub. 2021. Dostupné také z: [web] [cit. 12. 12. 2021] <https://ekolo.cz/baterie-elektrokola>.
35. 2021. Dostupné také z: [web] [cit. 12. 12. 2021] <https://www.solar-eshop.cz/p/baterie-victron-energy-lifepo-12-8-v-60-ah-bms/kapacita-12-8v-60ah/>.
36. ERICKSON, Jim. *Tips for extending the lifetime of lithium-ion batteries*. 2021. Dostupné také z: [web] [cit. 12. 12. 2021] <https://news.umich.edu/tips-for-extending-the-lifetime-of-lithium-ion-batteries/>.
37. BUREŠ, Petr. *APACHE 2022 - NOVÝ START VE VELKÉM STYLU*. 2021. Dostupné také z: [web] [cit. 12. 12. 2021] <https://mtbs.cz/clanek/apache-2022-novy-start-ve-velkem-stylu/kategorie/tech-news>.
38. *ELEKTROSADA SE ZAPLETENÝM MOTOREM*. 2021. Dostupné také z: [web] [cit. 12. 12. 2021] <https://apache-bike.cz/cs/elektrosada-se-zapletenym-motorem>.

39. TOOL, Park. *How to True a Wheel Part 2: Lateral Truing*. 2021. Dostupné také z: [web] [cit. 12. 12. 2021] https://www.youtube.com/watch?v=xz6nM6SY-aY&list=PLGCTGpvdT04STuv86bSd0xtSvXGIC-eh1&index=2&ab_channel=ParkTool.
40. SLINTÁK, Vlastimil. *Arduino a sériová komunikace*. 2011. Dostupné také z: [web] [cit. 12. 12. 2021] <https://uart.cz/139/arduino-a-seriova-komunikace/>.
41. *Databáze národní knihovny*. [N.d.]. Dostupné také z: [web] [cit. 12. 12. 2021] https://aleph.nkp.cz/F/?func=direct&doc_number=000000577&local_base=KTD.
42. SELECKÝ, Matuš. *Arduino: Uživatelská příručka*. Computer press, 2016. ISBN 978-80-251-4840-2.

Přílohy

A Kód arduina

[42]

```
#include <SoftwareSerial.h>
#include<TimerOne.h>

SoftwareSerial bt(8,9); //8RX,9TX

const int hallPin = 2; //interrupt pin pro senz. rychlosti
const int I=A0; //pin pro senz. proudu
const int napetiPin=A5; //pin pro senz. napeti
double obvodKola=2.14; //obvod kola v m
int tociSe; //pomocna promenna pro mereni rychlosti
float rychlost=0;
float rychlost2;
bool mark=true;
bool mark2;
float rozdil=1;
unsigned long prulet=0;
unsigned long prulet2=0;
float napeti=0;
int battBar=0;

void setup() {
  //nastaveni pinu, jako vstupu
  pinMode(hallPin, INPUT);
  pinMode(I, INPUT);
  pinMode(napetiPin, INPUT);
  //inicializace seriové komunikace s rychlosti přenosu 9600 baud
  Serial.begin(9600);
  bt.begin(9600);
  //prerušeni při změně z logické 1 na 0, spustí funkci
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(hallPin),funkce, FALLING);
  //každých 500 000 mikrosekund posle data skrz BT
  Timer1.initialize(500000);
  Timer1.attachInterrupt(btPosli);
}
```

```
//funkce, která čte napeti a rychlost a posle je
void btPosli()
{
    //čte napeti baterie (5.015 je porovnavaci napeti arduina,
    //8*, jelikoz napeti je snizeno napetovym delicem
    //deleno 1024, protoze rozliseni mereni je 10 bit
    napeti=(((float)analogRead(napetiPin) * 5.015*8) / 1024.0);

    //priprava pro moznost ukazovani dilku baterie, misto cisla
    /*
    if(napeti<32)
    {
        battBar=0;
    }

    else if(napeti<34)
    {
        battBar=1;
    }

    else if(napeti<36)
    {
        battBar=2;
    }

    else if(napeti<38)
    {
        battBar=3;
    }

    else if(napeti<40)
    {
        battBar=4;
    }

    else
    {
        battBar=5;
    }
    */

    //posila napeti a rychlost, napeti je zaporne, kvuli jednodussi
    //detekci v aplikaci mobilu
    bt.write(rychlost);
    bt.write(-napeti);
}
```

```

//funkce spoustena pri pruchodu magnetu, kolem Hallovy sondy
void funkce()
{
    prulet=millis(); //zaznamena cas
    mark=!mark; //ukazatel zmeny
}

//funkce modifikujici zpravu pri pozadavku na svetla
void Svetlamod(int co[], int zprava[])

//prida 16 (zvedne o 10 v decimal) druhou a osmou hodnotu
//druha urcuje pomoc a svetla, osm je kontroln suma
{
    for(byte i=0; i<9; i++)
    {
        zprava[i]=co[i];
    }
    zprava[1]=co[1]+16;
    zprava[7]=co[7]+16;
}

//posila zpravu
void Posli(int co[]) //Posle
{
    for(byte i=0; i<9;i=i+1)
    {
        Serial.write(co[i]);
        //Serial.print(co[i]);
        //Serial.print(" ");
    }
}

//seznam pomoci
void aktuPomoc(int pomoc, int co[])
{
    int asistence[7][9]={
        {85, 0, 25, 15, 26, 28, 136, 43, 13}, //level0-nepomaha
        {85, 1, 25, 15, 26, 28, 136, 44, 13}, //level1
        {85, 3, 25, 15, 26, 28, 136, 46, 13}, //level2
        {85, 5, 25, 15, 26, 28, 136, 48, 13}, //level3
        {85, 7, 25, 15, 26, 28, 136, 50, 13}, //level4
        {85, 9, 25, 15, 26, 28, 136, 52, 13}, //level5
        {85, 15, 25, 15, 26, 28, 136, 58, 13}}; //ForwardAssist

    /* for(byte i=0; i<5; i++) //kontrola matice
        {
            for(byte j=0; j<9; j++)

```

```

        {
            Serial.print(asistence[i][j]);
            Serial.print(" ");
        }
        Serial.println();
    }*/
    //ochrana, aby neposlalo ForwardAssist, nebo nesmysl
    //pokud pomoc je jina nez mozna, posila jednotce, aby nepomahala
    if(pomoc<0 || pomoc>6)
    {
        for(byte i=0; i<9;i=i+1)
        {
            co[i]=asistence[0][i];
        }
    }
    //pokud je pozadavek validni, zmeni zpravu na spravnou asistenci
    else{
        for(byte i=0; i<9;i=i+1)
        {
            co[i]=asistence[pomoc][i];
        }
    }
}

```

//hlavni funkce

```
void loop() {
```

```
char zMobilu; //co posle mobil
```

```
int zprava[9]; //zprava, kterou bude posilat kontroleru
```

```
int zpravaBezSvetel[9];
```

```
int svetla; //zadost o svetla
```

```
int pomoc; //pozadovana pomoc
```

//vypocet rychlosti

```
if (mark != mark2)
```

//pokud predchazejici stav neodpovida tomu naposledy

//vypocita rychlost

```
{ //doba trvani jedne otacky
```

```
rozdil=prulet-prulet2;
```

//aktualizace stavu

```
mark2=mark;
```

```
prulet2=prulet;
```

```
tociSe=1;
```

```
}
```

```
else
```

```
{
```

//kontrola zda uz se nemelo kolo otocit

```
if(millis()-prulet2>rozdil)
```

```
    {
      tociSe=0;
    }
  }

  //vypocet rychlosti
  rychlost=tociSe*obvodKola*1000*3.6/rozdil;

  //maze promnenou, pred nactenim nove
  zMobilu=0;

  //kontrola, zda z bt modulu doslo neco do vyrovnavaci pameti
  if (bt.available()>0)
  { //pokud ano, ulozi zpravu do promenne zMobilu
    zMobilu=bt.read();
  }

  //Serial.println(zMobilu); //pro kontrolu toho co prislo

  //podle toho, co prislo, meni pomoc
  switch (zMobilu)
  {
    case 'A':
      if (pomoc!=5)
        {pomoc=pomoc+1;}
        zMobilu=0;
      break;

    case 'B':
      if (pomoc!=0)
        {pomoc=pomoc-1;}
      break;

    case 'C':
      pomoc=0;
      break;

    case 'D':
      pomoc=5;
      break;

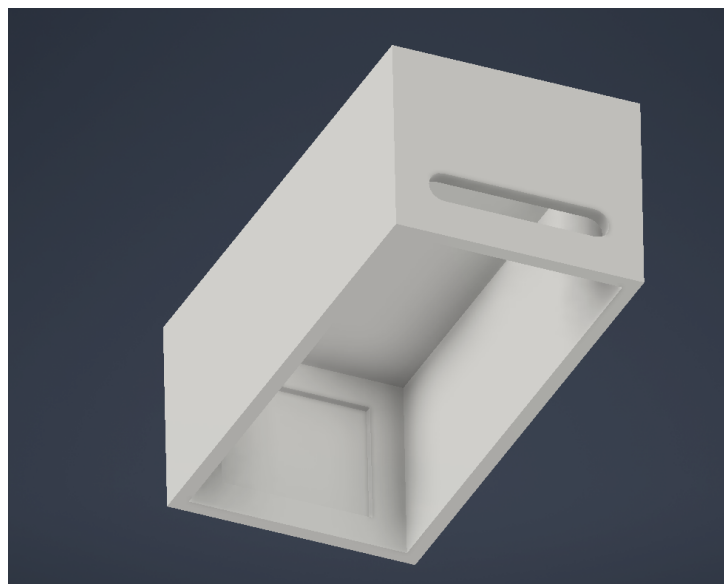
    case 'E':
      if (svetla==0)
        {svetla=1;}
      else {svetla=0;}
      break;

    case 'F':
      if (pomoc==0)
```

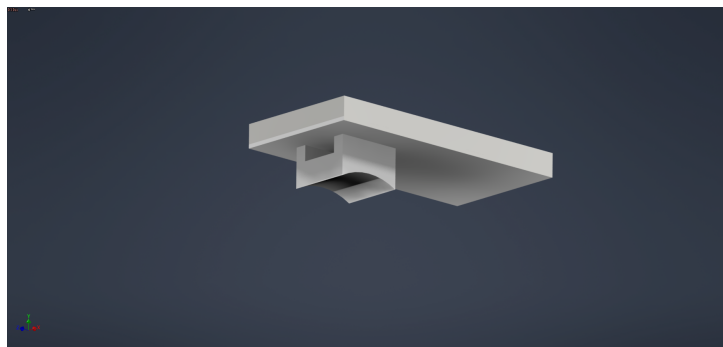


```
{pomoc=6;}  
break ;  
}  
  
//pripravi zpravu na poslani dle pozadovane pomoci  
aktuPomoc(pomoc, zpravaBezSvetel);  
  
//pokud je pozadavek na svetla, zavola modifikujici funkci  
//a podle zavola posilaci funkci, jinak nemeni a zavola Posli  
if (svetla==1)  
{  
  Svetlamod(zpravaBezSvetel ,zprava);  
  //Serial.println();  
  Posli(zprava);  
}  
  
else  
{  
  Posli(zpravaBezSvetel);  
}  
  
//pauza, aby kod nebehal tak rychle  
delay(200);  
}
```

B 3D tištěné obaly



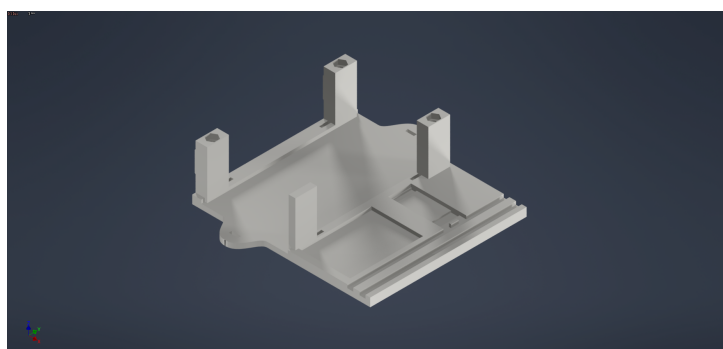
Obrázek 22: Víko senzoru rychlosti



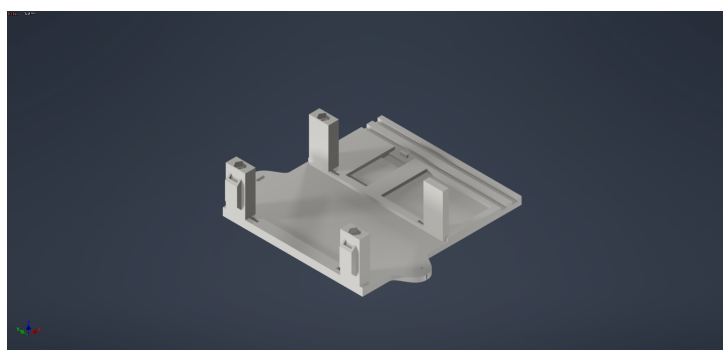
Obrázek 23: Spodní část obalu senzoru rychlosti



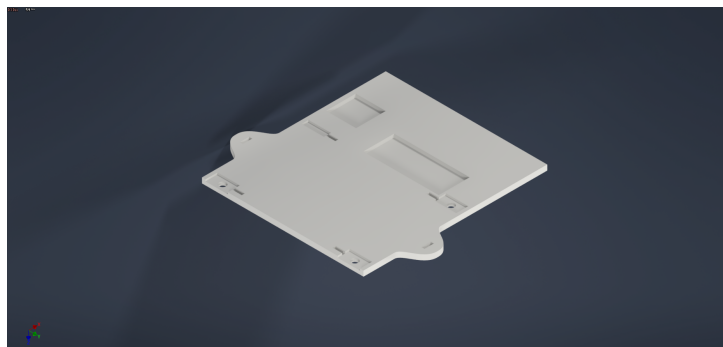
Obrázek 24: Spodní část obalu senzoru rychlosti



Obrázek 25: Hlavní část obalu systému



Obrázek 26: Hlavní část obalu systému



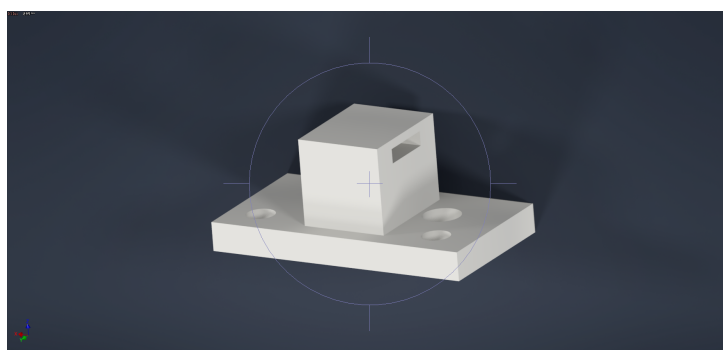
Obrázek 27: Víko obalu systému



Obrázek 28: Držák na mobil



Obrázek 29: Držák na mobil



Obrázek 30: Držák pro PAS

C Seznam použitého softwaru

- Overleaf - Online \LaTeX editor
- Pop OS
- Windows 10 a Windows 11
- Google Chrome
- Adobe Acrobat Reader DC
- GNU Octave
- Realterm: Serial Terminal
- LTSpice XVII
- Autodesk Inventor
- PrusaSlicer
- Circuit Diagram