



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

ELEKTROKOLA

E-BIKES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vít Rynda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Kamil Řehák, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Vít Rynda**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce: **Ing. Kamil Řehák, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Elektrokola

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Se zvyšujícím se zájmem o cyklistiku a možnosti překonání větších vzdáleností je v současné době velmi rozšířené využívání elektrokol. Na trhu je možné nalézt rozdílné koncepce pohonu, umístění baterie, které se zásadně podílejí na ovladatelnosti kola. V rámci bakalářské práce je cílem soustředit potřebné informace o dané problematice a na základě dostupných informací porovnat jednotlivé varianty, a to včetně využití numerické simulace.

Cíle bakalářské práce:

Provedení rešerše se zaměřením na pohonný trakt elektrokol.
Přehled současně používaných koncepcí.
Kritické zhodnocení jednotlivých koncepcí.
Návrh spolupráce elektromotoru a lidského pohonu včetně kritického zhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

SHIGLEY, J.E., MISCHKE, CH.R., BUDYNAS, R.G. Konstruování strojních součástí. VUTIUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá tématem elektromobility, konkrétně pohonným traktem elektrokol, popřípadě lehokol. Práce je zaměřena na nejpodstatnější části trakční soustavy, kterými jsou akumulátor a elektromotor. Zahrnuje rozbor jednotlivých koncepcí vzájemného uspořádání zdroje elektrické energie a elektromotoru aktuálně používaných elektrokol. Dále obsahuje popis a charakteristické vlastnosti akumulátorů, od minulých až po současné zástupce. Obsahuje také stručný popis používaných druhů elektromotorů. Praktická část zahrnuje práci se softwarem určeným pro úpravu a konfiguraci řídicích jednotek elektrických dopravních prostředků s centrálním elektromotorem. Je provedeno několik nastavení řídicí jednotky, kde každé z nich nabízí upravené limity výkonu motoru, úroveň asistence a chování při jízdě. Jednotlivá nastavení jsou otestována za stejných specifických podmínek a vzájemně porovnána. V závěru je navrženo možné ideální řešení v podobě nastavení hodnot ovládací jednotky pro zkoumaná kritéria.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektrokolo, akumulátor, koncepce, elektromotor, konfigurace, software, velomobil

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the topic of electromobility, specifically the drive tract of electric bicycles or recumbent bicycles. The thesis focuses on the most essential parts of the traction system, which are the battery and the electric motor. It includes an analysis of the different concepts of the mutual arrangement of the power source and the electric motor of currently used electric bicycles. It also includes descriptions and characteristics of batteries, from past to present representatives. It also includes a brief description of the types of electric motors in use. The practical part involves working with software designed for modifying and configuring the control units of electric vehicles with a central electric motor. Several control unit settings are made, where each of them offers customized motor power limits, assistance levels and driving behaviour. The individual settings are tested under the same specific conditions and compared with each other. Finally, a possible ideal solution is proposed in the form of control unit value settings for the examined criteria.

KEYWORDS

Electric bike, battery, concept, electric motor, configuration, software, velomobile

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RYNDA, Vít. *Elektrokola*. Brno, 2024. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí bakalářské práce Kamil Řehák. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157890>.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Kamila Řeháka a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 23. května 2024

.....
Jméno a přímení

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Kamilu Řehákovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky. Testování pohonného traktu bylo možné uskutečnit díky ochotě a spolupráci zaměstnanců, zejména panu Bovingovi, ze společnosti Katanga s.r.o., která má sídlo v Brno – Líšeň.

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| Úvod..... | 11 |
| 1 Elektrokola | 12 |
| 2 Právní kategorizace | 13 |
| 2.1 E-bike | 13 |
| 2.2 Pedelec..... | 13 |
| 2.3 S-pedelec | 13 |
| 3 Vzájemné uspořádání komponentů | 14 |
| 3.1 Akumulátory | 14 |
| 3.1.1 Akumulátor umístěný na nosiči..... | 14 |
| 3.1.2 Akumulátor umístěný za sedlovou trubkou..... | 15 |
| 3.1.3 Akumulátor umístěný na rámové trubce | 15 |
| 3.1.4 Akumulátor integrován v rámu..... | 16 |
| 3.2 Elektromotory..... | 16 |
| 3.2.1 Nábojový elektromotor..... | 17 |
| 3.2.2 Centrální elektromotor..... | 18 |
| 3.2.3 Elektromotor v rámové trubce..... | 18 |
| 3.2.4 Zhodnocení elektromotorů | 19 |
| 3.2.5 Zástupci elektromotorů..... | 20 |
| 4 Akumulátor a jeho články | 24 |
| 4.1 Zapojení článků | 25 |
| 4.1.1 Sériové zapojení | 25 |
| 4.1.2 Paralelní zapojení | 25 |
| 4.1.3 Sériově-paralelní zapojení | 26 |
| 5 Akumulátory | 27 |
| 5.1 Předchůdci lithiových akumulátorů..... | 27 |
| 5.1.1 Olověný akumulátor | 27 |
| 5.1.2 Nikl – kadmiový akumulátor..... | 28 |
| 5.1.3 Nikl – metalhydridový akumulátor..... | 29 |
| 5.2 Akumulátory využívající lithium | 30 |
| 5.2.1 Lithium – železo – fosfátový akumulátor..... | 30 |
| 5.2.2 Lithium – iontový akumulátor..... | 31 |
| 5.2.3 Lithium – polymerový akumulátor..... | 32 |
| 6 Velomobily..... | 33 |
| 6.1 Konstrukce velomobilu | 34 |
| 7 Praktická část..... | 36 |
| 7.1 Testovací model..... | 37 |
| 7.1.1 Bafang BBS-01..... | 37 |
| 7.1.2 Shark 36-5P | 38 |
| 7.1.3 APT TFT 500C..... | 39 |
| 7.2 Software..... | 39 |
| 7.3 Průběh testování | 39 |



| | | |
|--|------------------|-----------|
| 7.3.1 | Nastavení 1..... | 40 |
| 7.3.2 | Nastavení 2..... | 42 |
| 7.3.3 | Nastavení 3..... | 44 |
| Diskuse | | 46 |
| Závěr | | 47 |
| Použité informační zdroje | | 48 |
| Seznam použitých zkratk a symbolů | | 53 |

ÚVOD

V moderní společnosti se v posledních letech do popředí diskusních témat dostává potřeba ekologického řešení mobility, proto se výzkum zaměřuje na elektromobilitu. Tato bakalářská práce se bude zabývat alternativní dopravou, do které spadají elektrokola a dopravní prostředky jim příbuzné. Jedná se o způsob dopravy, jež umožňuje lidem levnou, pohodlnou, pružnou přepravu na krátkou vzdálenost bez většího lidského úsilí. Elektrokola představují významný prvek v rámci udržitelné mobility a jejich popularita v posledních letech rapidně roste právě v souvislosti s rostoucím zájmem o ekologii a odbourávání emisí vznikající dopravou. Moderní elektrokola se stávají vhodným společníkem také v rekreaci, kdy se za asistence elektromotoru lidé dostávají na místa, na která by se pouze vlastní fyzickou silou nebyli schopni dostat. Koncept elektrokola se může na první pohled zdát jako poměrně jednoduchý, ale skrývá se za ním řada technických a inženýrských výzev.

Rozdíl mezi klasickým jízdním kolem a elektrokolem je v pohonném traktu, jehož variabilita a vzájemné nakombinování má značný vliv na celkový výkon, dojezd, ovladatelnost a celkový jízdní zážitek z elektrokola. Tato práce se proto podrobně věnuje různým koncepcím pohonných traktů, které se v současnosti používají v elektrokolech. Zvláštní pozornost je věnována vzájemnému uspořádání akumulátoru a elektromotoru, což jsou dva klíčové komponenty každého pohonného traktu elektrokola. Jednotlivé koncepce v uspořádání těchto dvou komponent mají významný vliv na celkovou hmotnost elektrokola, jeho vyvážení, výkon a dojezd.

V posledních letech došlo k významnému pokroku v technologii akumulátorů, což umožnilo vývoj elektrokol s vyšším dojezdem, výkonem a kratší dobou nabíjení. Toto odvětví prochází neustálým vývojem, například ve směru optimalizace hmotnosti a velikosti akumulátorů, zlepšení bezpečnosti, životnosti a zvýšení podílu recyklace, již vyřazených systémů. V práci se analyzovaly a porovnávaly typy akumulátorů, jež se v současnosti masově používají. Každý z těchto typů akumulátorů má své specifické vlastnosti, výhody a nevýhody.

V praktické části byl využit software společnosti Bafang, který umožňuje upravovat ovládací jednotku středového motoru. Bylo provedeno několik nastavení, které byly testovány a nadále upravovány pro specifické potřeby. Z naměřených dat byl vyvozen závěr a bylo navrženo vhodné řešení pro dané testované podmínky. Pro testování navržených asistenčních úrovní byl vybrán čtyřkolový elektricky poháněný velomobil ze společnosti Katanga se středovým motorem. Velomobil byl vybrán z hlediska dostupnosti a možnosti testování. Velomobil nabízí stejné výsledky jako při použití elektrokola s tím rozdílem, že díky úložnému prostoru velomobilu bylo možno otestovat daná nastavení při rozdílných stupních zatížení.

1 ELEKTROKOLA

Elektricky poháněná jízdní kola jsou velkým hitem posledních let. Jedná se o levný způsob fyzicky nenáročné přepravy osob a malých nákladů. Elektrokolo funguje na principu umocňování vynaložené lidské síly pomocí elektromotoru. Přestože první komerčně vyráběná elektricky poháněná jízdní kola byla uvedena na trh již začátkem 90. let 20. století, prožívá toto odvětví rozmach až v současné době. Tehdejší akumulátory přes svou hmotnost a zástavbový prostor nenabízely požadovaný výkon a dojezd soustavy. Během vývoje vzniklo mnoho druhů elektrokol, jež jsou kategoricky řazeny. Hlavní kritérium, podle kterého se bicykl dále odvíjí, je způsob používání (městská a fitness kola, horská kola a kola pro přepravu nákladů či závodní kola). [1]

Každý funkční celek se skládá z několika hlavních částí, které odlišují elektrokolo od klasického jízdního kola. Mezi nejhlavnější části patří samozřejmě elektromotor a akumulátor. Motor slouží jako generátor mechanické energie potřebné pro pomoc při šlapání. Akumulátor je komponent sloužící pro uskladnění a následné uvolnění elektrické energie. Zdroje mají různé tvary, velikosti a výstupní výkon. Typ a velikost akumulátoru má vliv na kapacitu a celkový dojezd. Správná komunikace komponentů má vliv na komfortní jízdu, kterou zprostředkovává centrální elektronika.[3] Do tohoto celku jsou zahrnuta čidla a senzory zprostředkovávající potřebné vnější hodnoty. Komunikace s řídicí jednotkou je prostřednictvím ovladače s displejem, který informuje jezdce o aktuálním stavu nabití, rychlosti jízdy a zvoleném režimu jízdy, který lze měnit dle potřeby. S požadavky jezdce a způsobem používání elektrokola souvisí typ konstrukce rámu elektrokola a jeho koncepce, tj. vzájemné uspořádání akumulátoru a elektromotoru. S konkrétní koncepcí souvisí následná poloha těžiště i celkový komfort při jízdě. [3]

2 PRÁVNÍ KATEGORIZACE

Elektricky poháněné bicykly jsou podle typu konstrukce, způsobu jízdy, pohonu nebo vzhledu velmi rozmanité. Všechny kategorie elektrokol spojuje, že pokud se s nimi jezdec chce pohybovat po pozemních komunikacích, je nutno daný dopravní prostředek legislativně zařadit. Ve světě se z pohledu legislativy na elektrokola nahlíží odlišně. [4] Pokud se zaměříme pouze na kategorii elektrokol, tak po právní stránce se v Evropské unii (dále jen „EU“) dělí elektrokola na tři základní kategorie: E-Bike, Pedelec, S-Pedelec. Legislativa pohlíží na elektrokola jako na klasická jízdní kola v případě, že splňují daná omezení. [4]

2.1 E-BIKE

Elektrokola typu E-bike fungují tak, že výstupní výkon od motoru na hnané kolo je ovládán pomocí otočné rukojeti, páčky či tlačítka (podobně jako u elektrického mopedu). Výkon od motoru v této koncepci není pouze asistenční, ale funguje jako plná náhrada od mechanického šlapání vyvozené lidským úsilím. E-bike sice disponuje všemi mechanickými částmi jako klasické kolo (tj. šlapací pedály a řetězové soukolí), ty však slouží pouze jako okrajové řešení pro případ nedostatečného výkonu elektromotoru nebo při vybití akumulátoru. [5]

2.2 PEDELEC

U elektrokol typu Pedelec motor generuje výkon pouze v okamžiku, kdy je vyvozena síla od lidského šlapání. Množství podpory od elektromotoru je úměrné intenzitě šlapání (tzn. při přerušení šlapání, motor přestane dodávat kroutící moment). Výkon motoru a množství jeho asistence je dle EU legislativně omezeno tak, aby na vozidlo bylo nahlíženo jako na klasické jízdní kolo. Legislativa omezuje elektrokola maximálním výkonem elektromotoru na 250W a jeho asistenci do maximální rychlosti 25 km/h, při jejímž překročení přestane elektromotor podporovat jezdce v dalším zrychlování. [4]

2.3 S-PEDELEC

S-Pedelec jsou elektrokola typu Pedelec s elektrickým motorem, který má výkon vyšší než 250W a jeho podpora při šlapání pokračuje i při překročení rychlosti 25 km/h. Některé typy mohou mít naprogramovanou podporu od elektromotoru i bez nutnosti šlapání, kde je maximální rychlost menší. V EU je pro S-Pedelec maximální výkon motoru 4000W a podpora elektromotoru při šlapání až do rychlosti 45 km/h a bez šlapání do 6 km/h. [5] Legislativně je v EU tento typ řazen do kategorie mopedů a maloobjemových motocyklů, kde je pro jízdu na pozemních komunikacích nutná registrace, zákonné pojištění a nutnost použití motocyklové přilby. V některých zemích se tento typ nesmí používat na cyklostezkách. [5]

3 VZÁJEMNÉ USPOŘÁDÁNÍ KOMPONENTŮ

Mezi pilíře, které odlišují klasické jízdní kolo od elektrokola, patří zdroj elektrické energie neboli akumulátor a generátor pohybu, tedy elektromotor. Na trhu je v současné době uvedeno několik typů vzájemného uspořádání komponentů. Komponenty jsou zásadní pro funkčnost a výkon elektrokola a jejich uspořádání na rámu má významný dopad na celkovou ergonomii, rovnováhu a jízdní vlastnosti. Integrované řešení, akumulátor zapojuje skrytě do rámu, ale vnější montáž umožňuje snadnou výměnu a údržbu. Každé uspořádání přináší své výhody. [9]

3.1 AKUMULÁTORY

Poloha akumulátoru na elektrokole je jedna z konstruktérských výzev. Výsledné umístění není pouze designové, ale má vliv na výsledné vyvážení a těžiště stroje. Při návrhu vhodné pozice je třeba myslet i na ochranu před odcizením. Základna na rámu pro umístění akumulátoru se navrhuje tak, aby v budoucnu bylo možné stávající akumulátor vyměnit za větší a výkonnější. [6] V současnosti je na trhu několik variant, každá se vyznačuje svými klady a zápory a svou uživatelskou základnou. Nejrozšířenější polohy zdroje jsou: na nosiči, za sedlovou trubkou, na spodní rámové trubce, integrovaný ve spodní rámové trubce. [6]

3.1.1 AKUMULÁTOR UMÍSTĚNÝ NA NOSIČI

Jedna z nejběžnějších variant umístění akumulátoru je na zadním nosiči nad zadním kolem. Tímto prvkem disponují hlavně kola nižší cenové kategorie, určená primárně jako městská elektrokola. Samotný nosič je konstruován jako dvoupodlažní, kde na nižší ploše je umístěn akumulátor, aby horní plocha mohla být stále využívána pro přepravu menších nákladů. [7] Slabší stránka tohoto řešení v kombinaci s elektromotorem v náboji zadního kola je nerovnoměrné rozložení hmotnosti, posunuté těžiště do zadní části a s tím spojená horší ovladatelnost než u klasického jízdního kola. Absencí odolného obalu je akumulátor vystaven vyššímu riziku mechanického poškození či vyšším teplotním skokům. [7]



Obr. 1 Akumulátor na nosiči [8]

3.1.2 AKUMULÁTOR UMÍSTĚNÝ ZA SEDLOVOU TRUBKOU

Umístění akumulátoru za sedlovou rámovou trubku bicyklu je koncipováno pro podobné užití jako u konstrukce s akumulátorem umístěným na nosiči. Zdroj opticky splyne s rámem, klesne poloha těžiště, tím se zlepší ovladatelnost. S kombinací zadního nábojového elektromotoru a akumulátoru umístěným za sedlovou trubkou je těžiště soustavy umístěno v zadní části. Způsobuje nepřírozené rozložení váhy v porovnání s jízdou na klasickém kole. Při použití akumulátoru bez ochranného obalu se zvyšuje riziko degradace zdroje vlivem teplotních skoků nebo mechanickým poškozením. [8]



Obr. 2 Akumulátor za sedlovou trubkou [8]

3.1.3 AKUMULÁTOR UMÍSTĚNÝ NA RÁMOVÉ TRUBCE

Neoptimálnější umístění akumulátoru je na spodní rámové trubce. Kombinace akumulátoru na spodní rámové trubce a centrálního motoru, tj motor v ose otáčení klik, má nejpřirozenější rozložení hmotnosti. Váha akumulátoru výrazně nenarušuje polohu těžiště, přičemž nijak vizuálně nevyčívá a lze ji i designově zapracovat do celku. [9] U tohoto provedení je výhodou vyváženost kola. Za nedostatek lze považovat částečnou ochranu zdroje před meteorologickými jevy, teplotními skoky a mechanickým poškozením. Je možno tomu předejít použitím odolného obalu. [9]



Obr. 3 Akumulátor na spodní rámové trubce [8]

3.1.4 AKUMULÁTOR INTEGROVÁN V RÁMU

Evolucí akumulátoru na spodní rámové trubce je akumulátor plně integrován do spodní rámové trubky rámu jízdního kola. Tento typ v dnešní době převládá hlavně u vyšší cenové kategorie elektrokola z důvodu složitějšího vývoje a následné výroby. Výhody však převyšují cenu, kdy si zákazník zaplatí za esteticky hezké provedení. Pak lze už jen s obtížemi rozeznat elektrokolo od normálního jízdního kola. Integrace akumulátoru do trubky zajišťuje zvýšenou ochranu před vnějšími vlivy, odcizením či teplotními skoky. Díky zapouzdření si akumulátor při chladném počasí během vydávání energie sám vyhřívá své okolí a tím si optimalizuje podmínky pro vyšší dojezd. Jako nevýhodu lze považovat složitější servis a omezení velikosti akumulátoru daný vnitřním prostorem spodní rámové trubky. [6]



Obr. 4 Akumulátor integrován v rámu [8]

3.2 ELEKTROMOTORY

Elektromotor je jednou z hlavních součástí pohonného traktu. Specifické umístění motoru je zásadní pro celkové rozložení hmotnosti a umístění těžiště. Také má přímý vliv na jízdní vlastnosti elektrokola. Motor může být umístěn v několika různých pozicích, každá s vlastními výhodami a nevýhodami. [10] Pro nejpřirozenější polohu těžiště soustavy je elektromotor společně s akumulátorem umisťován nejnižší a nejblíže ke středové ose. Aktuálně používané koncepce využívají třech umístění: ve středu elektrokola (tzn. na ose šlapání), na ose předního nebo zadního kola, ukrytý ve spodní rámové trubce. Proto se motory dělí na centrální, nábojové a skryté. V současnosti jsou standartně používané třífázové elektromotory s napětím 24 V nebo 36 V. [10]

Konstrukčně se třífázový elektromotor skládá ze statoru, složeného ze třech samostatně vinutých měděných cívek, a rotoru s obsahem permanentních magnetů. Princip funkce elektromotoru je založen na průchodu třífázového proudu cívkami, které jsou zapojeny do třech samostatných obvodů. Při průchodu střídavého proudu vinutím statoru vzniká rotační magnetické pole způsobující roztočení výstupní hřídele (rotoru) v souladu s tímto polem.

3.2.1 NÁBOJOVÝ ELEKTROMOTOR

Nábojový elektromotor pro elektrokola se skládá z třífázového elektromotoru a planetové převodovky. Po přivedení elektrického proudu na vinutí elektromotoru vzniklé rotační magnetické pole, které roztočí výstupní hřídel. Na výstupní hřídeli je umístěna planetová převodovka, kde ozubení tvoří požadovaný převodový poměr. Přes planety a oběžné kolo je krouticí moment přenesen až na výplet kola, ráfek a pneumatiku. [12] Takto provedené přímé propojení motoru s kolem má za následek dobrý přenos síly z motoru na kolo. Díky jednoduché konstrukci je sestava bezporuchová, popřípadě jednoduchá na opravu. [11]



Obr. 5 Elektromotor v zadním náboji [11]

Elektromotory umístěné do středu jednoho z kol jsou v dnešní době na ústupu před centrálními elektromotory. Mezi hlavní důvody upouštění od této varianty může být menší citlivost na dávkování plynu, s tím spojena neefektivní jízda a následně i vyšší spotřeba a nižší dojezd. Další nevýhoda je složitá ovladatelnost z důvodu jiného rozložení váhy než u klasické koncepce. Je zde zvýšená možnost pádu způsobená zmiňovanou menší citlivostí na dávkování plynu a zvýšené riziko proklouznutí pneumatiky. I to je příčina proč se odstupuje od nábojových motorů, hlavně v předním kole. Nedostatky jsou zvýšená hlučnost a složitější oprava při defektu z nutnosti odpojení elektroniky a potřeby speciálního nářadí pro demontáž elektromotoru od rámu. [12]



Obr. 6: Nábojový elektromotor s planetovou převodovkou [52]

3.2.2 CENTRÁLNÍ ELEKTROMOTOR

V současnosti neexistuje lepší pohonný systém z hlediska rozložení hmotnosti na rámu, jízdních vlastností i využití potenciálu motoru. Centrální motor je vysoce efektivní. Soustava je poháněna kombinací člověkem vynaložené síly a tomu úměrnému množství energie od motoru. Velikost asistence lze regulovat pomocí doprovodné elektroniky. Doprovodná elektronika potřebná pro správnou funkci soustavy se sestává z řídicí jednotky, ovladače a několika senzorů. Základními jsou senzory na frekvenci otáčení klik a na tlak v pedálech (tj. torzní senzor). Senzory zaznamenávají informace z vnějšího prostředí a řídicí jednotka vyšle příslušný signál do motoru, který rychle přizpůsobí požadovaný výkon. Proto je jízda na elektrokole plynulá a přirozená. Těžiště je umístěno ve středu rámu, a proto zlepšuje jízdní vlastnosti. [13]



Obr. 7 Elektromotor umístěn ve středu šlapání [11]

Mezi hlavní části patří pevná část s počtem cívek zapojených do třech samostatných obvodů. Rotor obsahuje magnety, které jsou při průchodu třífázového proudu cívkami přitahovány, a tím se rotor roztočí. Výstupní hřídel z elektromotoru je kolmo na hlavní osu otáčení klik. Mezi osou šlapání a výstupním hřídelem z motoru je převodová skříň, která kombinuje sílu od člověkem vynaloženého šlapání a výkonem od elektromotoru. Množství výkonu je vygenerováno na základě hodnot ze senzorů. Výslednice těchto momentů je přenášena řetězem na pastorek zadního kola. Potřebný převodový poměr je tvořen pomocí sady řetězových kol jako u klasického bicyklu. [13]

3.2.3 ELEKTROMOTOR V RÁMOVÉ TRUBCE

Méně známé provedení elektromotoru je umístění ve spodní rámové trubce kola, jež liniově spojuje řídítka i místo, kde je pevně umístěna osa klik šlapání. V tomto provedení jde hlavně o vzhled elektrokola, aby zůstal co nejvíce podobný klasickému bicyklu. Konstrukčně je motor válcového tvaru, jehož průměr se odvíjí od světlosti použité trubky rámu. Kombinace točivého momentu od elektromotoru a lidského šlapání je realizována pomocí dvou pastorků s čelním ozubením, kde jeden pastorek je umístěn na výstupu z motoru a druhý na zmiňované ose klik. Ovládání dopomocí od elektromotoru neprobíhá pomocí čidla a řídicí elektroniky, ale přes manuální sepnutí tlačítka. [14] Proto tento typ není v dnešní době tolik rozšířený. Jízda s trubkovým elektromotorem probíhá takto: při potřebě pomoci od motoru jezdec sepně spínač a motor začne plně podporovat otáčivý pohyb klik. Při této fázi musí jezdec nepřetržitě šlapat, protože je vyrušena funkčnost volnoběžky. Při zastavení musí jezdec opět stisknout spínač a tím vyvést motor z funkce. [14]

Jízda není plynulá, je méně vhodná pro klasické použití, například do města. V některých typech je celek doplněný elektronikou, která umožňuje diagnosticky nastavit pomalejší nástup, maximální otáčky motoru nebo odpojení motoru při jezdce vygenerovaném odporu proti pohybu otáčení klik. Při jízdě s dopomocí elektromotoru se kliky otáčejí stále stejnou rychlostí, proto je stále třeba pracovat s řazením pro změnu rychlosti jízdy. [14]



Obr. 8 Elektromotor umístěný ve spodní rámové trubce [15]

Tato varianta elektrického jízdního kola není v běžném provozu příliš obvyklá. Jízda na takovém elektrokole vyžaduje speciální přístup jezdce, který musí být obeznámen s tím, jak motor reaguje. Při zapnutí elektromotoru musí být jezdec schopen přizpůsobit svůj styl jízdy, aby přešel nečekaným situacím. Jezdec musí být také fyzicky schopen zvládnout náhlé zrychlení a mít dostatečné zkušenosti s ovládnutím elektrokola, aby zajistil bezpečnou jízdu pro sebe i pro ostatní uživatele silnice. Tento celek tvoří velmi lehké elektrokolo ideální pro uživatele, kteří vyhledávají klasický vzhled i za cenu menšího pohodlí. Klasického vzhledu lze dosáhnout spojením nenápadného spínače a akumulátoru umístěného do podsedlové brašny nebo podélné sedlové trubky. Častokrát je tento typ elektrokola spojován s mechanickým dopingem při cyklistických závodech. [15]

3.2.4 ZHODNOCENÍ ELEKTROMOTORŮ

Každý typ použitého elektromotoru má své výhody i nevýhody. U středového motoru lze vyzdvihnout jeho nízkou hmotnost a malé rozměry. Tyto faktory dělají jízdu obratnou a stabilní. Pro menší citlivost na dávkování plynu se doporučuje na jízdu ve městě, kde nehrozí ztráta přilnavosti a možný pád zapříčiněný prudkým nárůstem točivého momentu. Centrální motory svou pozicí zajišťují rovnoměrné rozložení váhy, přirozenou polohu těžiště, a proto zvyšují stabilitu a ovladatelnost. Tento typ motoru je vybaven řadou senzorů a ovládací jednotkou, která zefektivňuje jízdu, lze ho využít i v náročném nebezpečném terénu. Skrytý motor se stává trendem až posledních let, kde díky svému umístění a prakticky neviditelnému provedení může nabídnout hlavně svou designovou atraktivitu, ale má složitější obsluhu. Výběr elektromotoru pro elektrokolo záleží na konkrétních preferencích daného spotřebitele a typu jízdy, na kterou bude primárně elektrokolo využíváno.

3.2.5 ZÁSTUPCI ELEKTROMOTORŮ

V současnosti trh nabízí různá provedení pro jednotlivé typy používaných elektromotorů (středový, centrální a skrytý elektromotor). Například jsou používány tyto elektromotory: BLDC motor 250W/36V BASE, BLDC motor 1000W/48V, 8FUN 250W/36V, 8FUN BBS03 1000W/48V, Fazua Ride 60. [47]

BLDC MOTOR 250W/36V BASE

Motor vyráběný společností E-POHON je určený jako pomocný zdroj mechanické energie, který je umístěn ve středu otáčení kola. Disponuje planetovou převodovkou, zajišťující přenos točivého momentu ze statoru na kolo, a volnoběžkou, která neklade žádný jízdní odpor během jízdy bez motoru. [47]



Obr. 9: Nábojový motor BLDC 250W/36V BASE [47]

Tab. 1: Parametry motoru BLDC 250W/36V BASE [47]

| Parametry motoru: | Hodnoty |
|-------------------|-----------|
| Počet magnetů | 20 [-] |
| Točivý moment | 12,1 [Nm] |
| Výkon | 250 [W] |
| Napětí | 36 [V] |
| Průměr | 139 [mm] |
| Hmotnost | 2,7 [kg] |
| Převodovka | planetová |

BLDC MOTOR 1000W/48V

Nábojový elektromotor robustní konstrukce, který je schopen generovat vysoký výkon. Motor není určen jako dopomoc při šlapání, má nahradit úsilí jezdce a má dávat soustavě možnost dosahovat vyšších rychlostí. Díky vysokému výkonu umožňuje překonávat velká zatížení vyšší silou. [48]



Obr. 10 Nábojový motor BLDC 1000W/48V [48]

Tab. 2: Parametry motoru BLDC 1000W/48V [48]

| Parametry motoru: | Hodnoty |
|-------------------|-----------|
| Počet magnetů | 46 [-] |
| Točivý moment | 27,3 [Nm] |
| Výkon | 1000 [W] |
| Napětí | 48 [V] |
| Průměr | 243 [mm] |
| Hmotnost | 6,4 [kg] |
| Převodovka | ne |

8FUN 250W/36V

Středový elektromotor je vyroben společností Bafang, který je umístěn na střed otáčení klik. Skládáním sil jezdce a motoru je možno dosáhnout maximálních výsledků. Motor obsahuje senzory a řídicí elektroniku pro dosažení plynulosti jízdy a volbu velikosti dopomoci. [49]



Obr. 11 Centrální motor 8FUN 250W/36V [49]

Tab. 3: Parametry motoru 8FUN 250W/36V [49]

| Parametry motoru: | Hodnoty |
|-------------------|------------------------------|
| Maximální otáčky | 83 [min ⁻¹] |
| Točivý moment | 80 [Nm] |
| Výkon | 250 [W] |
| Napětí | 36 [V] |
| Maximální hluk | 55 [dB] |
| Hmotnost | 3,9 [kg] |
| Řídící jednotka | integrovaná, programovatelná |
| Pedálový senzor | integrovaný |

8FUN BBS03 1000W/48V

Výkonný středový elektromotor společnosti Bafang, který je umístěn na střed otáčení klik, dosahuje vysokého výkonu. Možnost změny převodového stupně umožňuje překonat velká zatížení větší silou. Motor obsahuje senzory a řídicí elektroniku pro dosažení plynulosti jízdy a volbu velikosti dopomoci. [50]



Obr. 12 Centrální motor 8FUN BBS03 1000W/48V [50]

Tab. 4: Parametry motoru 8FUN BBS03 1000W/48V [50]

| Parametry motoru: | Hodnoty |
|-------------------|------------------------------|
| Maximální otáčky | 83 [min ⁻¹] |
| Točivý moment | 130 [Nm] |
| Výkon | 1000 [W] |
| Napětí | 48 [V] |
| Maximální hluk | 55 [dB] |
| Hmotnost | 5 [kg] |
| Řídící jednotka | integrována, programovatelná |
| Pedálový senzor | integrováný |

FAZUA RIDE 60

Zástupce skrytých motorů Fazua Ride 60 je nenápadně zapracován do rámu kola. Umístění motoru blízko středu otáčení nabízí lepší rozložení váhy a polohu těžiště soustavy. Výstupní hřídel elektromotoru je přímo napojena na planetovou převodovku. Složení točivého momentu od elektromotoru a od šlapání jezdce je uskutečněno šikmým ozubením integrovaným do místa otočného uložení klik. Motor je vybaven ovládací jednotkou umožňující volbu jízdních režimů. [51]



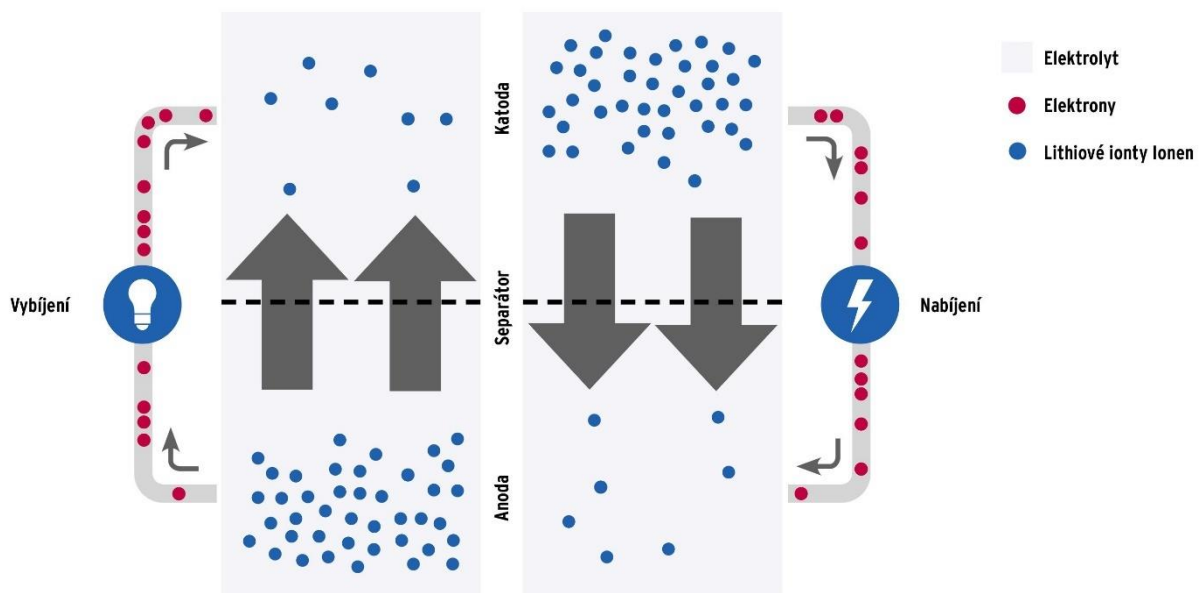
Obr. 13: Motor Fazua Ride 60 [51]

Tab. 5: Parametry motoru Fazua Ride 60 [51]

| Parametry motoru: | Hodnoty |
|-------------------|-----------|
| Maximální výkon | 450 [W] |
| Nominální výkon | 250 [W] |
| Točivý moment | 60 [Nm] |
| Hmotnost | 1,96 [kg] |

4 AKUMULÁTOR A JEHO ČLÁNKY

Akumulátor je elektrochemické zařízení sloužící k uchování a následnému uvolnění elektrické energie. Každý akumulátor je sestaven ze skupiny článků do takzvaného paketu, kde každý článek obsahuje reaktanty. Reaktantem je záporná i kladná elektroda a prostředí, ve kterém jsou tyto elektrody umístěny. Prostředí neboli elektrolyt je látka kapalného nebo pevného skupenství. Akumulátor uvolňuje elektrickou energii v podobě stejnosměrného proudu. Při zapojení akumulátoru do uzavřeného elektrického obvodu začne v článku probíhat chemická reakce. Při vybíjení začne proud elektronů proudit od záporné elektrody směrem ke kladné. Z chemické energie se začne tvořit energie elektrická, která je následně produkována do elektrického obvodu a může být využita elektrickými spotřebiči. [16] Pro nabití akumulátoru je třeba dodat elektrickou energii z vnější. Při nabíjení se elektrony začnou pohybovat opačným směrem než při vybíjení, a to od kladné k záporné elektrodě. Doba trvání tohoto děje je závislá na času přeměny všech aktivních hmot reaktantů. [16]



Obr. 14 Princip funkce akumulátoru [34]

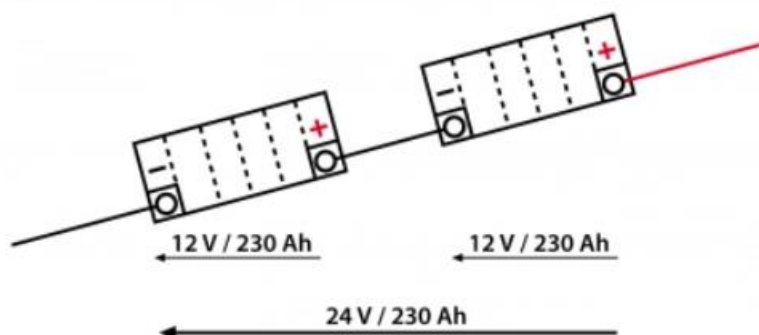
Baterie má schopnost jednorázového uchování elektrické energie a následné vybíjení. Je to důsledkem toho, že v baterii při vybíjení probíhají nevratné chemické reakce. Při pokusu nabít baterii pomocí dodání vnější elektrické energie se reaktanty nevrátí do původního stavu ani pozice. Znovu nabitá baterie nebude mít výkon ani kapacitu jako při prvním použití. Proto je nabíjení baterií zbytečné a nebezpečné. Baterie je rovněž nazývána jako primární článek a akumulátor jako sekundární článek. [16]

4.1 ZAPOJENÍ ČLÁNKŮ

Akumulátor je složen z jednotlivých článků, které je potřeba sestavit v požadované konfiguraci, aby bylo dosaženo potřebných výstupních hodnot. Druh zapojení ovlivňuje velikost výsledného napětí i kapacitu. Druhy zapojení jsou: sériové, paralelní, sériově-paralelní. [17]

4.1.1 SÉRIOVÉ ZAPOJENÍ

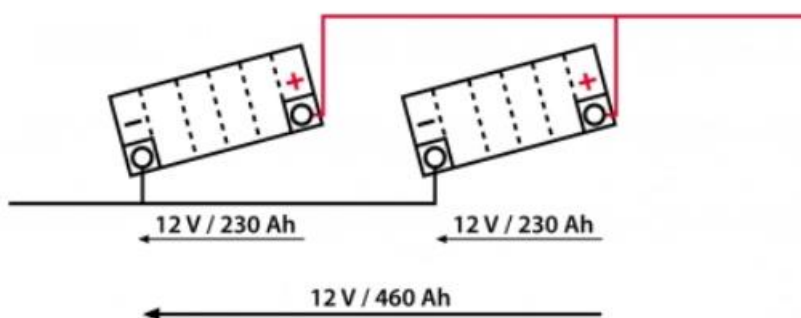
Při sériovém zapojení jednotlivých článků, tj. za sebe, se vždy vodivě propojí kladný pól jednoho článku se záporným pólem článku dalšího. Výsledkem této konstrukce je zvýšení výstupního napětí soustavy na úroveň, jež je rovna součtu jmenovitého napětí každého z počtu zapojených článků. V sestavě je nutné použití nejméně odlišných článků. Při kombinaci článků např. s různým napětím, vnitřním odporem či stářím, může v obvodu docházet k nerovnoměrné distribuci napětí a nesymetrii při vybíjení a následném nabíjení. [17]



Obr. 15 Schéma sériového zapojení [17]

4.1.2 PARALELNÍ ZAPOJENÍ

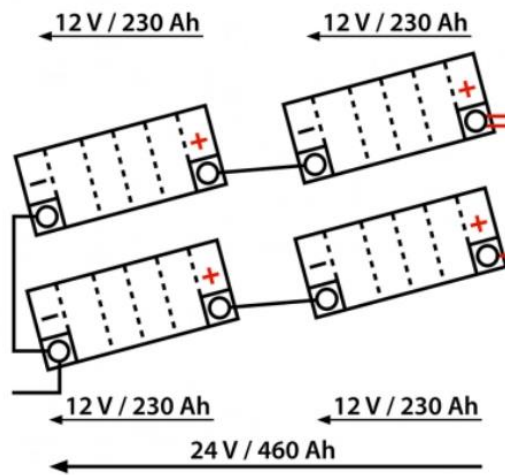
Při paralelním zapojení jednotlivých článků, tj. vedle sebe, se vodivě propojí zvlášť kladné póly a zvlášť i všechny póly záporné. Výsledkem konstrukce je zvýšení výstupní kapacity na hodnotu součtu zapojených článků. Hodnota napětí zůstane na úrovni jednoho článku. V zapojení je nutné použití článků se stejným napětím pro zabránění vzniku nežádoucích vyrovnávacích proudů mezi jednotlivými články. [17]



Obr. 16 Schéma paralelního zapojení [17]

4.1.3 SÉRIOVĚ-PARALELNÍ ZAPOJENÍ

V elektromobilitě je klíčové dosáhnout optimálního výkonu a kapacity baterie, což vyžaduje kombinaci sériového a paralelního zapojení článků v akumulátoru. Sériové zapojení zvyšuje napětí baterie, kapacita zůstává stejná jako u jednoho článku. Paralelní zapojení zvyšuje kapacitu, napětí zůstává na úrovni jednoho článku. Pro dosažení vyššího napětí a zároveň větší kapacity je třeba články zapojit do série a následně tyto vzniklé série propojit paralelně. Výsledný zdroj má výstupní napětí tolikrát vyšší, kolik článků je zapojeno do série, a kapacitu tolikrát vyšší, kolik článků je zapojeno paralelně. Takto sestavený zdroj je nazýván sériově-paralelní, kde se spojují výstupní hodnoty a vzniká požadovaný akumulátor. [17]



Obr. 17 Schéma sériově-paralelního zapojení [17]

5 AKUMULÁTORY

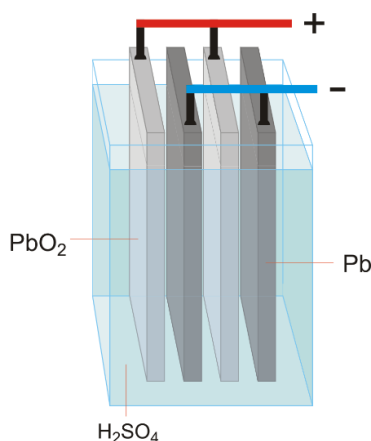
Kapitola se podrobně věnuje různým typům akumulátorů (sekundární články), které jsou nezbytnou součástí elektromobility. Akumulátory jsou zdrojem elektrické energie pro pohyb dopravního prostředku, definují dojezd, výkon a celkovou užitnou hodnotu elektricky poháněných dopravních prostředků. Akumulátory používané v dnešních elektrokolech či lehokolech: lithium-iontové (Li-ion), nikel-metal hydridové (NiMH) a olovené akumulátory. [18]

5.1 PŘEDCHŮDCI LITHIOVÝCH AKUMULÁTORŮ

Rozvojem chemického průmyslu se vyvíjely také akumulátory. První vznikly olovené akumulátory, které byly nahrazeny nikel-kadmiové (NiCd) a nikel-metal hydridové (NiMH) systémy. Tyto technologie položily základy pro dnešní pokročilé systémy ukládání energie. [18]

5.1.1 OLOVĚNÝ AKUMULÁTOR

Typickým zástupcem akumulátorů by se dal nazvat olovený akumulátor. Sekundární článek je tvořen dvěma olovenými elektrodami, které jsou ponořeny v prostředí tvořené roztokem kyseliny sírové. Katoda, záporná elektroda, je tvořena čistým olovem (Pb) a anoda, kladná elektroda, je tvořena oxidem olovičitým (PbO₂). Takto postavený článek produkuje napětí přibližně 2V. Elektrody jsou v článku v podobě desek, kolem kterých je roztok ve formě kapaliny napuštěné v mikroporézní skelné vatě nebo ve formě gelu. [18] Díky ztužení elektrolytu do formy gelu klesá energetická hustota, ale zároveň se akumulátor stává bezúdržbovým. [19]



Obr. 18 Průřez oloveným akumulátorem [19]

Olověný akumulátor se přestal v elektrokolech používat z důvodu nevhodnosti. Přestože je bezúdržbový, jeho energetická hustota je nízká. Pro dosažení kapacity modernějších akumulátorů bychom museli olověný akumulátor zvětšit. Tím se zvyšuje hmotnost, která je u elektrokol rozhodující. [19] Tento druh akumulátoru lze rozdělit na dva typy: startovací a trakční. Jelikož má olověný akumulátor vlastnost dodávat rázový proud, je vhodnější využití ve startování spalovacího motoru než pro dlouhodobý odběr při jízdě na elektrokole. Pro elektrokolo by byl vhodnější trakční typ, ten je ovšem ideální pro malý, ale dlouhodobý konstantní odběr. Není vhodný pro příležitostné vybíjení a nabíjení, ke kterému v elektromobilitě dochází. Při špatném zacházení s olověným akumulátorem dochází k sulfataci. [20]

SULFATACE

Sulfatace je chemický jev spojený výhradně s olověnými bateriemi a akumulátory. Články negativně ovlivňují krystaly síranu olovnatého na elektrodách. Snižují se hodnoty kapacity, proudu a napětí dodávané akumulátorem. [2] Vzniklé krystaly $PbSO_4$ se během nabíjení, při kterém se původní amorfní síran rozkládá na jednotlivé složky, účastní chemické reakce v menší míře. Tak dochází k postupnému znehodnocování článku. K procesu sulfatace dochází vždy. Na rychlosti degradace závisí okolní podmínky a hodnota stavu nabití. Proces urychluje zvýšená okolní teplota a vybitý stav. [20] Sulfataci lze rozdělit na vratnou a nevratnou. Při vratné fázi jemné krystaly síranu olovnatého, vzniklé během vybíjení, lze zpětným nabitím akumulátoru rozložit do původního stavu a proces sulfatace zvrátit. Nevratné stádium nastává, když krystaly $PbSO_4$ jsou příliš rozměrné a nabitím neodstranitelné. Desulfataci lze tento proces zvrátit. Je to složitý proces, kdy je nutné akumulátor dlouhodobě formátovat pomocí chytré nabíječky, která postupně mění nabíjecí hodnoty. Po zformátování je nutno dohustit elektrolyt. [21]



Obr. 19 Projev sulfatace u autobaterie [22]

5.1.2 NIKL – KADMIOVÝ AKUMULÁTOR

S příchodem niklu do oblasti výroby akumulátorů začaly být olověné systémy nahrazovány modernějšími řešeními. Jedním z nich byl nikl-kadmiový typ, zkráceně NiCd, s jmenovitým napětím článku 1,2V. Mezi jeho výhody patří necitlivost vůči špatnému zacházení (nabíjení/vybíjení přes stanovenou úroveň či rychlonabíjení). [23] NiCd typ nahradil olověný akumulátor nižší hmotností. Kadmium, ze kterého je tvořena záporná elektroda je toxické.

Aktuálně je NiCd považován ze neperspektivní hlavně z důvodu negativního jevu, jenž provází a ovlivňuje jeho dobíjení. Jedná se o takzvaný paměťový efekt. [23]

PAMĚŤOVÝ EFEKT

Paměťový efekt je nežádoucí jev spojovaný výhradně s NiCd akumulátorem, dochází k jeho znehodnocování. Tento úkaz vzniká při nevhodném používání – při zahájení nabíjení z jiné úrovně než úplného vybití. Při častém opakování si akumulátor „zapamatuje“ tuto novou hranici a při dalším vybíjení dosažením této hranice přestane dodávat energii. [24] Tento problém lze vyřešit pomocí opakovaného hluboké vybití a následného nabití do plné kapacity, kde dojde k rekrystalizaci a efekt dočasně zmizí. [25]

5.1.3 NIKL – METALHYDRIDOVÝ AKUMULÁTOR

Dalším z používaných typů zdrojů energie u elektrokol je nikel-metal hydridový akumulátor, zkráceně Ni-MH, s jmenovitým napětím článku 1,2V. Tento sekundární článek je sestaven ze dvou elektrod. Katoda je tvořena slitinou jistých kovů, které jsou schopny akumulovat vodík. [26] Kombinací slitin s vodíkem dojde k vytvoření dvouprvkových sloučenin, které se nazývají hydridy. V současnosti se používají slitiny kovů na bázi vzácných zemin (praseodym, cer, lanthan...) s frakcemi niklu, kobaltu, manganu a hliníku. Kladná elektroda (anoda) je ve všech případech tvořena z oxid-hydroxidu nikelnatého. Obě elektrody jsou ponořeny v alkalickém elektrolytu, jež je tvořen hydroxidem draselným (draselný louh). Akumulátory jsou vyráběny v podobě válečků, které jsou dále spojovány do nejrůznějších konfigurací a řetězců. Nejznámějším zástupcem je typ AA či AAA. [26]



Obr. 20 NiMH článek [26]

V posledních letech prošla tato konstrukce velkými změnami: zlepšování vlastností elektrod, ztenčování separátorů, zmenšování balení. Na trhu se objevují ekologičtější, lépe recyklovatelné materiály, které jsou dostupnější a snášejí rychlonabíjení bez znatelnější újmy na funkčnosti. Hlavní nevýhodou pro použití u elektrokol je znatelné samovybíjení, citlivost na okolní teplotu. Při teplotě kolem bodu mrazu akumulátor přestane dodávat energii. Obnovení dodávek energie začne po následném ohřátí. Při vyšší teplotě se akumulátor začne znatelně samo-vybíjet. [27] Používají se v oblasti malých, nepřetržitě používaných spotřebičů, pracujících v ustálené okolní teplotě (např. hodinky, požární hlásiče...). Při malé velikosti akumulátoru je samovybíjení zanedbatelné. Vysoká životnost a recyklovatelné materiály dělají systém ekologický. Ni-HM akumulátory jsou globálně nahrazovány lithiovými systémy. [26]

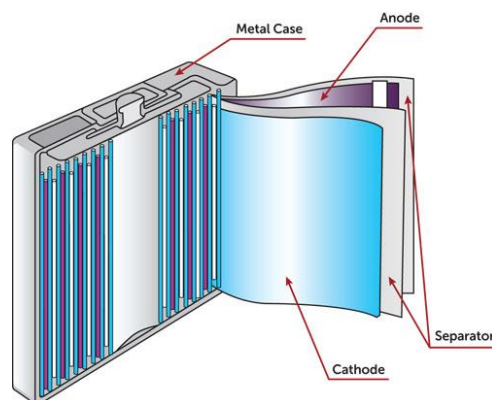
5.2 AKUMULÁTORY VYUŽÍVAJÍCÍ LITHIUM

V posledních letech se stále více pozornosti věnuje vývoji a využití lithiových akumulátorů, které jsou považovány za klíčovou technologii v oblasti elektromobility. Lithiové systémy díky svým jedinečným vlastnostem: vysoká energetická hustota, dlouhá životnost, schopnost rychlého nabíjení, nízká míra samovybíjení a možnost příležitostného dobíjení. Lithiové články se staly nezbytnou součástí moderních elektricky poháněných dopravních prostředků. Mezi lithiové akumulátory patří: lithium-železo-fosfátový, lithium-iontový, lithium-polymerový [28]

5.2.1 LITHIUM – ŽELEZO – FOSFÁTOVÝ AKUMULÁTOR

Lithium-železo-fosfátový akumulátor, zkráceně LFP, je to typ lithiového akumulátoru. Materiál použitý pro zápornou elektrodu je prvek chemicky označovaný LiFePo_4 neboli fosforečnan lithný. Materiál kladné elektrody je ve většině případů lithiových akumulátorů stejný, uhlík. [29]

Tento typ akumulátoru lze považovat jako lepší alternativu k olověným akumulátorům. Elektrody s elektrolytem tvoří článek o jmenovitém napětí 3,2V. Pro požadované napětí (12–14V) je použito menší počet článků a tím je ušetřen zástavbový prostor a hmotnost. Dalším rozdílem od klasických olověných zdrojů je absence sulfatace (krystalizace síranu olovnatého). U olověných akumulátorů bylo nutné akumulátor zcela vybit a následně jednorázově plně nabít, jinak docházelo k jejich znehodnocování. U LFP není problém akumulátor dobíjet příležitostně. Výhody jsou: tepelná stabilita při uvolňování energie, malé samovybíjení, vysoká životnost a cykličnost, tj. vybití na doporučené minimum a opětovné nabití na doporučené maximum. [30] Nahrazením toxických látek (kobalt, nikl) lze dosáhnout bezpečnějšího a ekologičtějšího provedení. LFP akumulátory mají nízkou energetickou hustotu. Proto je nutné akumulátory vyrábět objemnější a tím pádem i těžší. [31]

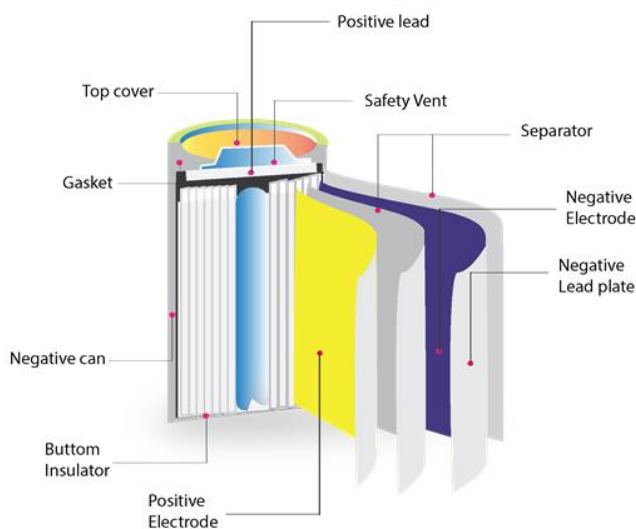


Obr. 21 Průřez akumulátorem LiFePo_4 [31]

Hlavní odvětví v oblasti užívání LFP systému je v záložních domácích nebo přenosných akumulátorových systémech.[32] V elektromobilitě se LFP zdroje používají hlavně pro jejich bezpečnost a dlouhou životnost. Pro dosahování lepších výsledků kvůli hmotnosti a rozměrům jsou LFP akumulátory nahrazovány jinými lithiovými systémy. [30]

5.2.2 LITHIUM – IONOVÝ AKUMULÁTOR

Příchod lithium-ionového akumulátoru byl zcela zásadní pro vývoj přenosné elektroniky. Oproti svým předchůdcům (Ni-Mh, Ni-Cd aj.) disponuje značnými výhodami: vysoká životnost, nižší vnitřní odpor, nízká hmotnost a možnost vysokých proudových odběrů bez negativního vlivu. Předností Li-ion akumulátoru je vysoká energetická hustota, díky které lze nashromáždit větší množství elektrické energie při stejném rozměru akumulátoru oproti předchozím technologiím. Jediný článek má napětí 3,6V, zajišťuje úsporu prostředků i prostoru. Pro dosažení podobného napětí jednoho Li-ion článku by bylo nutné použít tři Ni-Cd. [33] Nový Li-ion akumulátor není třeba před prvním použitím formátovat, lze ho používat kdykoliv v libovolném stavu nabití. Li-ion mají velmi nízké samovybití, mohou být bez údržby několik měsíců bez výrazné změny v nabití. Nejvhodnější skladování je mezi 20-80% kapacity nabití. [34]



Obr. 22 Průřez Li-Ion článkem [35]

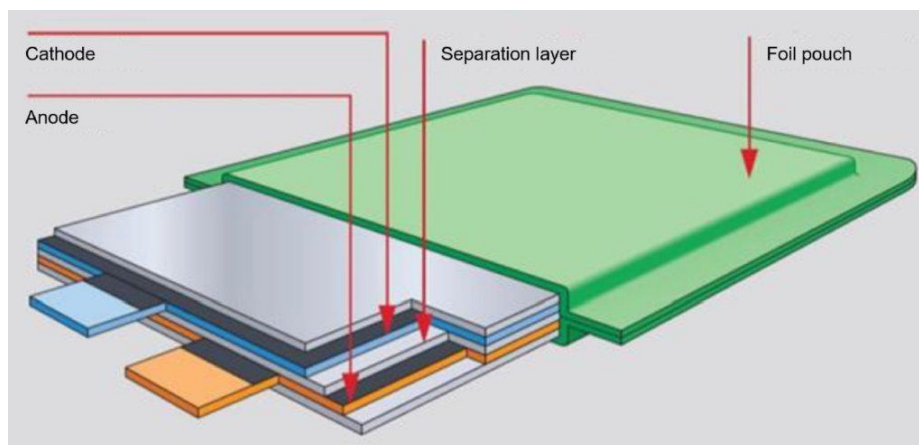
Technicky se Li-ion akumulátor neliší od ostatních. Zdroj je složen z jednotlivých článků, obsahujících dvojici elektrod ponořených v iontově vodivém elektrolytu, který je zde zastoupen ve formě lithiové soli v organickém rozpouštědle. V elektrolytu probíhá přenos iontů mezi jednotlivými elektrodami. Další konstrukční prvek obsažený v článku je separátor. Ten zajišťuje fyzické oddělení jednotlivých elektrod a zabraňuje zkratu. Elektrody i separátor jsou ve formě plátů naskládáných na sebe a narolovány do válcového obalu. Zvýšení kapacity akumulátoru, při zachování rozměru obalu, lze provést ztenčením jednotlivých plátů a tím navýšit jejich počet. [35] Směr pohybu iontů je dán tím, zda se akumulátor v danou chvíli nabíjí či vybíjí. [2]

Při zapojení akumulátoru do obvodu, a jeho následném používání, začnou obvodem proudit elektrony konající elektrickou práci. Na anodě začnou uvolňovat ionty putující elektrolytem skrze separátor ke katodě. Během nabíjení se celý proces obrátí až do stupně plného nabití. [2]

Za nevýhody lze považovat nutnost specifického zacházení, protože Li-ion akumulátor je náchylný na mechanické poškození, které je doprovázeno zkratem a možným vzplanutím. Schránky pro akumulátory elektrokol jsou konstruovány tak, aby chránily důležité části před vibracemi, přímým slunečním světlem, skokovými změnami teplot či záměrným mechanickým poškozením. U Li-ion technologie je třeba článek opatřit řídicí elektronikou, která hlídá jeho stav (podvybití, přebití) a zabraňuje jeho degradaci. [36]

5.2.3 LITHIUM – POLYMEROVÝ AKUMULÁTOR

Lithium-polymerový akumulátor patří mezi aktuálně hojně používané zdroje elektrické energie. Jmenovité napětí jednoho článku je 3,6V. Vznikl přepracováním Li-ion akumulátoru. U Li-ion článků je konstrukce provedena do tvaru válečku a Li-pol článek má tvar plochých pouzder. [35]



Obr. 23 Průřez Li-pol akumulátorem [35]

Konstrukčně se článek skládá z kladné a záporné elektrody, jež jsou ve formě desek naskládány střídavě na sebe a odděleny separátorem. Obsažený elektrolyt je přítomen ve formě vodivého polymeru (gelu), který je vhodnější z důvodu bezpečnosti před rozlitím. Kde se nevyžadují vysoké nároky na ochranu, používá se pro základní krytí kovová folie. Pro náročnější použití je třeba zvolit odolnější obal zdroje. Největší předností je vysoká hustota, která určuje množství uchovatelné elektrické energie. Vyznačuje se odolností proti paměťovému efektu, samovybíjení a degradaci při vysokém počtu cyklů. [29]

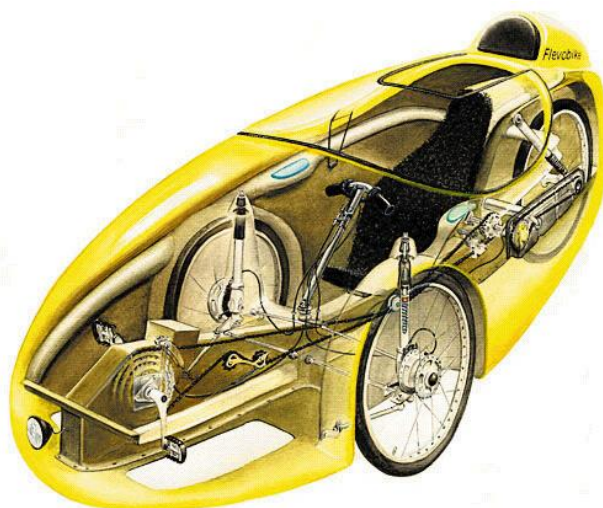
Nevýhodou je obtížné nabíjení a vybíjení. Články vyžadují zvýšenou péči. Je nežádoucí jejich přebíjení, kdy se prudce snižuje životnost. Při přebíjení se článek zahřívá a může dojít ke vznícení či výbuchu. K degradaci dochází i v opačném případě, při poklesu napětí pod krajní hodnotu článek ztratí svou funkčnost a je nutná jeho výměna. Články je nutné opatřovat čipy, které by těmito situacím měli zamezit. Nedostatkem je také citlivost na extrémní teploty. [37] Pro zachování životnosti je vhodné článek pravidelně dobíjet. [37]

6 VELOMOBILY

Velomobil je typ dopravního prostředku využívající se v alternativní dopravě. Jde o transportní nástroj konstrukčně vycházející z klasického jízdního kola, poháněný lidskou silou. Zásadní rozdíl odlišující velomobil od jízdního kola je upravená konstrukce a přidání aerodynamického obalu, jenž má za úkol snížit jízdní odpor a zároveň ochránit jezdce před povětrnostními vlivy. Mezi další rozdíly od jízdního kola lze brát přítomnost ergonomického sedadla eventuálně možnost zavazadlového prostoru pro přepravu menších nákladů. To však závisí na typu konstrukce a samotného obalu. [42]

Velomobily na pozemních komunikacích lze spatřit jen zřídka. Jeho omezená dostupnost vychází z malosériové výroby a nízké poptávky. Oproti klasickým jízdním kolům jsou velomobily podstatně větší a těžší. Mají horší manévrovatelnost a problémy při parkování. Problém s velikostí konstrukce je při provozu za snížené viditelnosti, kdy může hrozit zvýšené nebezpečí dopravní nehody. Tyto faktory snižují poptávku po této variantě přepravy. [42]

Princip pohonu velomobilu se neliší od pohonu klasického jízdního kola. Síla vygenerovaná od jezdce je přenášena přes kliky na řetězové kolo a pomocí řetězového převodu až na zadní kolo velomobilu. Rozdíl od jízdního kola je v rozdílné poloze jezdce. Dráha řetězu je upravena tak, aby řetěz nebránil jezdci ve šlapání. Proto je přidána kladka nebo kluzák pod sedadlo (Obr.24). [42]

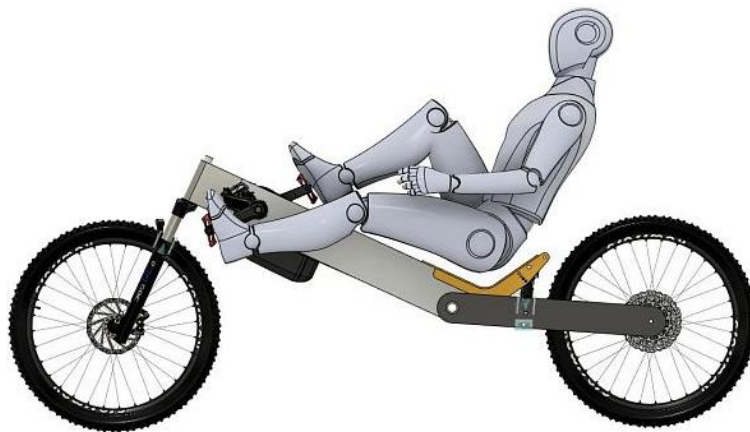


Obr. 24 Průřez velobilem [40]

Velomobil lze doplnit o elektricky napájený pomocný pohonný trakt. Tím lze z velomobilu vytvořit prostředek pro každodenní využití se zachováním komfortu bez větší vynaložené lidské námahy. Elektrický velomobil, na rozdíl od elektrického jízdního kola, může obsahovat i vhodný zavazadlový prostor, čímž může v městské dopravě konkurovat malému osobnímu autu. [43]

6.1 KONSTRUKCE VELOMOBILU

Velomobil konstrukčně vychází z lehokola. Jde o dopravní prostředek poháněný lidskou silou, která přes šlapání do klik a řetězového převodu způsobuje pohyb celé soustavy. Jízda na lehokole připomíná jízdu na klasickém jízdním kole. Na lehokole je pozice jezdce lehce rozdílná. Na jízdním kole je osa klik pod úrovní trupu jezdce. Na lehokole, popřípadě velomobilu je osa šlapání více v přední části (Obr. 25). Velomobil se od lehokola liší tím, že obsahuje ochrannou karoserii. Tento obal, vyrobený ze sklolaminátu nebo z uhlíkových vláken, má snižovat vzdušný odpor za jízdy, poskytovat jezdci ochranu před povětrnostními vlivy nebo poskytnout krytý zavazadlový prostor. [42] Rozdělení velomobilů je podle počtu kol. Na trhu se objevují dvou, tří nebo čtyř kolové varianty.



Obr. 25 Poloha jezdce na lehokole [44]

Dvoukolová varianta velomobilu není příliš běžná. Její výhodou je lehčí manipulovatelnost. Má ale i své nevýhody. Pro absenci třetího bodu má sníženou stabilitu. [43]

Tříkolová varianta je v dnešní době nejoblíbenější. Lze ji dále dělit na dvě skupiny dle počtu kol na nápravách. Delta velomobil má jedno kolo vpředu a dvě vzadu. Jedno kolo vpředu má výhodu v lepší manévrovatelnosti v nízkých rychlostech, podobně jako u klasického jízdního kola, kde lze předním kolem otáčet do velkých úhlů. Tědpole velomobil má jedno kolo v zadní části a dvě kola vpředu. Tento typ uspořádání má výhodu ve vyšší ovladatelnosti a stabilitě při vyšších rychlostech. [43] Avšak lepší stabilita je vykoupená složitější konstrukcí přední nápravy s řízením (Obr. 24). [43]



Obr. 26 Koncept Delta velomobilu [41]

Čtyřkolová varianta má nejvyšší stabilitu a zároveň díky vyššímu počtu kol i zvýšenou trakci. Čtyřkolový velomobil nabízí mnoho výhod, avšak také spoustu nevýhod. Hlavní nevýhodou je hmotnost. Přidáním dalšího kola je svázána složitější a těžší náprava. Čtyřkolové varianty, které jsou určeny pro přepravu těžších nákladů, jsou vybaveny širšími koly na zadní nápravě. Širší pneumatiky zvyšují kontaktní plochu s podložkou a tím zvyšují trakci. Toto provedení vyžaduje montáž diferenciálu na zadní nápravu, ten zvyšuje stabilitu a ovladatelnost stroje za jízdy. [42]. Všechny tyto úpravy vedou ke zvýšení použitelnosti velomobilu, ale také zvýšení celkové hmotnosti a širě karoserie. [42]

Velomobily všech variant je možno vybavit elektrickým pohonným traktem, který napomáhá jezdci v pohybu dopravního prostředku. Pohonná soustava obsahuje stejné prvky jako elektrokolo (elektromotor, akumulátor a řídicí jednotku pro správnou komunikaci komponentů). [43] Rozdíl mezi elektrickým a klasickým velobilem je stejný jako rozdíl mezi elektrickým a klasickým jízdním kolem. Způsob přidání asistované síly závisí na způsobu pohonu. Pokud je velomobil vybaven nábojovým elektromotorem je jeho funkce závislá na poloze spínače, kterým je motor zařazován a vyřazován z funkce. Použitím středového motoru je umocňována velikost dopomoci na základě velikosti síly vygenerované jezdce do klik. [43]

7 PRAKTICKÁ ČÁST

Cílem bakalářské práce je programování řídicí jednotky pro návrh spolupráce elektromotoru a lidského pohonu. Během práce bude nutné pochopit funkce programu a následně pomocí něj provést několik nastavení ovladače řídicí jednotky, který umožňuje uživateli vybrat si z několika úrovní dopomoci od elektromotoru, a to s ohledem na různé jízdní podmínky a osobní preference.

V první fázi bude provedeno základní nastavení ovladače se všemi jeho základními vstupními hodnotami, které jsou nutné pro správně fungování celé sestavy. Následně bude testováno několik variant velikosti dopomoci od minimálního zásahu až po plný výkon elektromotoru. Každá z těchto variant bude testována v různých jízdních podmínkách – od rovných silnic až po náročné stoupání.

Testování bude zahrnovat sběr dat o výkonu motoru a dosažené rychlosti, které budou zapsány, analyzovány a porovnány. Tento proces nejenže umožní optimalizaci nastavení pro různé typy terénu, ale také poskytne cenné informace o efektivitě a výkonnosti elektrického pohonu velomobilu.

Testování je zásadním krokem v optimalizaci jakéhokoli systému. Konkrétním úkolem našeho testu bude určit a následně ověřit nejvhodnější variantu nastavení pro danou situaci. Budou stanoveny tyto podmínky:

- změřit hodnotu špičkového výkonu motoru při rozjezdu na rovině
- změřit hodnotu ustáleného výkonu motoru při ustálené rychlosti na rovině
- změřit hodnoty maximální rychlosti na rovině
- změřit hodnotu špičkového výkonu motoru při rozjezdu ve stoupání
- změřit hodnotu ustáleného výkonu motoru při ustálené rychlosti ve stoupání
- změřit hodnoty maximální rychlosti ve stoupání

- změřit hodnotu špičkového výkonu motoru při rozjezdu na rovině s přidanou zátěží
- změřit hodnotu ustáleného výkonu motoru při ustálené rychlosti na rovině s přidanou zátěží
- změřit hodnoty maximální rychlosti na rovině s přidanou zátěží
- změřit hodnotu špičkového výkonu motoru při rozjezdu ve stoupání s přidanou zátěží
- změřit hodnotu ustáleného výkonu motoru při ustálené rychlosti ve stoupání s přidanou zátěží
- změřit hodnoty maximální rychlosti ve stoupání s přidanou zátěží

Každý bod bude mít tři měření s různým nastavením ovládací jednotky.

7.1 TESTOVACÍ MODEL

Pro daný úkon byl poskytnut prototyp čtyřkolového elektrického velomobilu Pony4 ve verzi CARGO ze společnosti Katanga s.r.o. Brno – Líšeň. Testovací model je čtyřkolová varianta velomobilu s trubkovým rámem, ke kterému jsou za pomoci dřevěné konstrukce přichycena kola. Konstrukce je vybavena středovým elektromotorem BBS-01, ovladačem APT TFT 500C a Li-ion akumulátorem Shark 36V.



Obr. 27 Testovaný model Pony4 CARGO

7.1.1 BAFANG BBS-01

Testovaný elektrický velomobil Pony4 se vybavil středovým elektromotorem typu BBS-01, který na vozidle slouží pouze jako pedálový asistent. Dopomoc se aktivuje v závislosti na velikosti síly vyvozené od šlapání jezdce do klik. Nominální výkon motoru je omezen na 250W, aby se daný prostředek řadil do kategorie jízdních kol.



Obr. 28 Elektromotor BBS-01 [45]

Tab. 6 Parametry elektromotoru BBS-01 [45]

| Parametr | Hodnota |
|-----------------------------------|--------------------------------|
| Typ pohonu | Bafang BBS-01 (středový pohon) |
| Nominální výkon pohonu | 250 [W] |
| Maximální výkon pohonu | 350 [W] |
| Kroutící moment pohonu | až 80 [Nm] |
| Maximální otáčky pohonu za minutu | 78 [min ⁻¹] |
| Proud pohonu | 18 [A] |
| Hlučnost pohonu | 55 [dB] |
| Napětí pohonu | 36 [V] |
| Systém asistence pohonu | Pedelec, pedálový asistent |
| Hmotnost | 3,8 [kg] |

7.1.2 SHARK 36-5P

Každé elektricky poháněné vozidlo je vybavené zdrojem elektrické energie. V našem případě se jednalo o Lithiový akumulátor Shark s nominálním napětím 36V s řídicí elektronikou, která zabraňuje jeho znehodnocení při nevhodném zacházení. Akumulátor je umístěn v nákladovém prostoru nad zadní nápravou v dokovací ližině, která zabraňuje samovolnému pohybu akumulátoru během jízdy. Mechanická ochrana článků je řešena pomocí krytu vyrobeného z lehkého robustního plastu [46].



Obr. 29 Akumulátor Shark 36-5P [46]

Tab. 7 Parametry akumulátoru Shark 36-5P

| Parametr | Hodnota |
|---------------------------|--------------------|
| Nominální napětí | 36 [V] |
| Nabíjecí napětí | 42 [V] |
| Maximální nabíjecí proud | 2-4 [A] |
| Nominální kapacita | 17 [Ah] / 612 [Wh] |
| Ochrana nadproud/ podbití | Ano/ Ano |
| Provozní teplota | -20 ~ +45 [°C] |

7.1.3 APT TFT 500C

Pro fungování celé soustavy se použila ovládací jednotka umožňující jezdcům ovládat různé funkce elektromotoru. Ovladač slouží jako prostředník mezi jezdce a elektrickým systémem kola. Práce s ovladačem je přes celografický, kompaktní a odolný displej. Dva páry tlačítek umožňují jezdcům komunikovat s ovládací jednotkou a nastavit stupně dopomoci od elektromotoru, sledovat stav kapacity akumulátoru, rychlost a ujetou vzdálenost.

7.2 SOFTWARE

Komponenty pohonného traktu testovaného modelu komunikovaly na softwaru vyvinutého společností Bafang. Tento program nabízí možnost konfigurovat funkce velomobilu se středovým motorem řady BBS. Nástroj umožňuje nastavovat velikost dopomoci od elektromotoru. Na jednotlivých stupních dopomoci je možné omezovat maximální rychlosti soupravy, prodlevy při sepnutí či vypnutí motoru.

Po spuštění programu Bafang Configuration Tool se vkládají vstupní parametry. Jako první parametr se vložilo minimální napětí akumulátoru, při kterém jednotka zastaví funkci motoru, aby nedošlo k nadměrnému vybití a degradaci zdroje. Při použití akumulátoru, který produkuje napětí o velikosti 36V je minimální hranice nastavena výrobcem na 30V. Jako další parametr je maximální proud, kterým lze napájet elektromotor. Maximální povolený proud od výrobce je 18A. Dále se nastavuje typ snímače rychlosti kola a kolik impulzů vyše snímač do jednotky během jedné otočky kola. Pro přesné údaje o rychlosti je nutné zadat průměr hnaného kola. V našem případě 20". Nejdůležitější vkládané údaje jsou o jednotlivých stupních dopomoci. Velikost asistence od elektromotoru má 10 úrovní. Každá úroveň obsahuje dvě hodnoty: podíl množství proudu dodávaného do motoru a podíl maximální dosažitelné rychlosti, která je nastavena v ovládací jednotce. Při dosažení mezních hodnot je další růst elektronicky omezen.

7.3 PRŮBĚH TESTOVÁNÍ

Každý předem stanovený bod byl měřen třikrát s různým nastavením ovládací jednotky. Byly zkoumány následující hodnoty. Špičkový výkon od motoru při rozjezdu, ustálený výkon za jízdy a maximální dosažená rychlost. Prvně bylo provedeno testování jednotky při rozjezdu po rovině. Testování proběhlo na dvě zvolené úrovně dopomoci a každá úroveň byla testována na dva převodové stupně. Následně bylo provedeno testování při rozjezdu do kopce na dvě úrovně dopomoci od elektromotoru. Všechny zkoušky byly testovány dvakrát. Jednou pouze s jezdce a následně byla přidána zátěž o velikosti 60 kg. Tento postup testování se při každé změně nastavení ovládací jednotky opakoval. Nastavení bylo upravováno třikrát.

7.3.1 NASTAVENÍ 1

V prvním nastavení byly úrovně asistence seřizeny tak, že od úrovně Assist 1 byla úroveň elektrického proudu procházejícím motorem nastavena na 50 % celkového výkonu a omezení rychlosti na 40 % z maximální rychlosti 25 km/h. V dalších úrovních asistence podíl průchozího proudu motorem zůstává na stejné hodnotě a pouze se zvyšuje podíl z maximální povolené rychlosti vozidla (Obr. 30).

| Assist levels | Current Limit [%] | Speed Limit [%] |
|---------------|-------------------|-----------------|
| Assist 0: | 0 | 0 |
| Assist 1: | 50 | 40 |
| Assist 2: | 50 | 60 |
| Assist 3: | 50 | 80 |
| Assist 4: | 50 | 100 |
| Assist 5: | 60 | 100 |
| Assist 6: | 70 | 100 |
| Assist 7: | 80 | 100 |
| Assist 8: | 90 | 100 |
| Assist 9: | 100 | 100 |

Obr. 30 Úrovně dopomoci Nastavení 1

V tabulce jsou uvedeny hodnoty maximálního dosaženého výkonu od elektromotoru, výkonu od motoru v ustáleném stavu a maximální dosažená rychlost na daný rychlostní a asistenční stupeň.

Tab. 8 Dosažené hodnoty elektromotoru na rovině bez zátěže

| | Při rozjezdu [W] | V ustálení [W] | Max. rychlost [km/h] |
|-----------------------|------------------|----------------|----------------------|
| Assist 4 / Rychlost 4 | 120 | 81 | 12,8 |
| Assist 4 / Rychlost 8 | 210 | 120 | 14,4 |
| Assist 8 / Rychlost 4 | 320 | 80 | 12,1 |
| Assist 8 / Rychlost 8 | 400 | 320 | 21 |

Tab. 9 Dosažené hodnoty elektromotoru na rovině se zátěží

| | Při rozjezdu [W] | V ustálení [W] | Max. rychlost [km/h] |
|-----------------------|------------------|----------------|----------------------|
| Assist 4 / Rychlost 4 | 210 | 160 | 10,8 |
| Assist 4 / Rychlost 8 | 280 | 200 | 16,5 |
| Assist 8 / Rychlost 4 | 340 | 260 | 13,7 |
| Assist 8 / Rychlost 8 | 420 | 340 | 20,3 |

Tabulky číslo 8 a 9 zaznamenávají změnu hodnot výkonu motoru při přidání zátěže oproti nezátíženému stavu. Aby maximální rychlost byla na blízké hodnotě, je elektromotor nucen generovat vyšší výkon pro rozjezd i následně pro jízdu v ustáleném stavu.

V případě testu Assist 8/ Rychlost 4 je zřetelný propad výkonu od elektromotoru mezi rozjezdem a ustálením. Při větší dopomoci motor vygeneruje vysoký výkon, soustava rychle akceleruje, při malém převodovém stupni má jezdec nižší frekvenci šlapání. Při nedostatečném šlapání jednotka přestane vysílat proud do motoru a ten přestává asistovat. Jízda není plynulá. Při testu s přidáním zatížením je výsledek ze stejného nastavení jízdně přijatelnější.

Tab. 10 Dosažené hodnoty v kopci bez zátěže

| | Při rozjezdu [W] | V ustálení [W] | Max. rychlost [km/h] |
|-----------------------|------------------|----------------|----------------------|
| Assist 4 / Rychlost 1 | 200 | 170 | 4 |
| Assist 8 / Rychlost 1 | 320 | 270 | 5 |

Tab. 11 Dosažené hodnoty v kopci se zátěží

| | Při rozjezdu [W] | V ustálení [W] | Max. rychlost [km/h] |
|-----------------------|------------------|----------------|----------------------|
| Assist 4 / Rychlost 1 | 280 | 200 | 4 |
| Assist 8 / Rychlost 1 | 350 | 300 | 5 |

Tabulky číslo 10 a 11 zachycují hodnoty z testování v kopci se stoupáním 8 % na nejnižší převodový stupeň. Počáteční impulz síly musí vycházet od šlapání jezdce, kdy senzor otáčení klik vyše impulz do ovládací jednotky, která vyše proud do motoru.

Z tabulek je zřejmé, že při rozjezdu je špičkový výkon od motoru větší než při ustálení na menší hodnotě. Když byl velomobil zatížen, je výkon z motoru vyšší v obou případech. S vyšším výkonem vzroste i spotřeba elektrické energie. Na celkovou rychlost zatížení nemá vliv.

7.3.2 NASTAVENÍ 2

Ve druhém nastavení byly upraveny hodnoty maximálního proudu procházejícího elektromotorem a hranice maximálních rychlostí u nižších úrovní asistence (Obr. 31). Velikost maximálních proudů je odstupňována od menších hodnot u malých asistenčních stupňů s ohledem na menší akceleraci soustavy v prostředí mezi lidmi.

The screenshot shows the 'Pedal Assist' configuration screen. At the top, there are three tabs: 'Basic', 'Pedal Assist', and 'Throttle Handle', with 'Pedal Assist' selected. Below the tabs, there are several settings:

- Low Battery Protection [V]: 31
- Current Limit [A]: 18
- Assist levels table with columns for Current Limit [%] and Speed Limit [%]:

| Assist level | Current Limit [%] | Speed Limit [%] |
|--------------|-------------------|-----------------|
| Assist 0: | 0 | 0 |
| Assist 1: | 20 | 15 |
| Assist 2: | 27 | 30 |
| Assist 3: | 35 | 40 |
| Assist 4: | 40 | 60 |
| Assist 5: | 55 | 80 |
| Assist 6: | 67 | 90 |
| Assist 7: | 75 | 100 |
| Assist 8: | 85 | 100 |
| Assist 9: | 100 | 100 |
- Speed Meter Type: External, Wheel Meter
- Speed Meter Signals: 1
- Wheel Diameter [Inch]: 20

Obr. 31 Úrovně dopomoci Nastavení 2

Tab. 12 Dosažené hodnoty elektromotoru na rovině bez zátěže

| | Při rozjezdu [W] | V ustálení [W] | Max. rychlost [km/h] |
|-----------------------|------------------|----------------|----------------------|
| Assist 4 / Rychlost 4 | 160 | 80 | 11,7 |
| Assist 4 / Rychlost 8 | 240 | 160 | 14,8 |
| Assist 8 / Rychlost 4 | 280 | 80 | 12,2 |
| Assist 8 / Rychlost 8 | 360 | 280 | 21,2 |

Tab. 13 Dosažené hodnoty elektromotoru na rovině se zátěží

| | Při rozjezdu [W] | V ustálení [W] | Max. rychlost [km/h] |
|-----------------------|------------------|----------------|----------------------|
| Assist 4 / Rychlost 4 | 200 | 140 | 11,4 |
| Assist 4 / Rychlost 8 | 240 | 160 | 14,2 |
| Assist 8 / Rychlost 4 | 320 | 80 | 11,4 |
| Assist 8 / Rychlost 8 | 400 | 320 | 20,3 |

Tabulky číslo 12 a 13 zaznamenávají změnu hodnot výkonu motoru při přidání zátěže oproti nezatíženému stavu. Celkový pocit z dopomoci od elektromotoru byl daleko lepší. Vlivem snížení maximálních hodnot na nízkých stupních dopomoci, snížením hranice podílu maximální rychlosti celé soustavy, do které elektromotor podporuje jezdce, byla jízda na malé stupně bezpečnější a pohodlnější.

U zkoumaných hodnot je ve většině případů možné vidět drobné snížení hodnot výkonu od elektromotoru. Snížením těchto hodnot dojde k poklesu spotřeby elektrické energie. Hodnoty maximálních dosažených rychlostí v porovnání mezi Nastavením 1 a 2 se liší jen minimálně.

Tab. 14 Dosažené hodnoty v kopci bez zátěže

| | Při rozjezdu [W] | V ustálení [W] | Max. rychlost [km/h] |
|-----------------------|------------------|----------------|----------------------|
| Assist 4 / Rychlost 1 | 160 | 120 | 4,7 |
| Assist 8 / Rychlost 1 | 300 | 280 | 5,2 |

Tab. 15 Dosažené hodnoty v kopci se zátěží

| | Při rozjezdu [W] | V ustálení [W] | Max. rychlost [km/h] |
|-----------------------|------------------|----------------|----------------------|
| Assist 4 / Rychlost 1 | 240 | 200 | 2,8 |
| Assist 8 / Rychlost 1 | 320 | 280 | 6,8 |

Tabulky číslo 14 a 15 zachycují hodnoty z testování v kopci se stoupáním 8 % na nejnižší převodový stupeň. Počáteční impulz síly musí vycházet od šlapání jezdce, kdy senzor otáčení klik vyšle impulz do ovládací jednotky, která vyšle proud do motoru.

Z tabulek je zřejmé, že při rozjezdu je špičkový výkon od motoru větší než při ustálení na menší hodnotě. Když byl velomobil zatížen, je výkon z motoru vyšší v obou případech. S vyšším výkonem vzroste i spotřeba elektrické energie.

7.3.3 NASTAVENÍ 3

U třetího upravení hodnot v ovládací jednotce bylo zkoumáno, jestli lze snížit hodnoty maximálního výkonu od motoru tak, aby byla zachována maximální dosažitelná rychlost při stejném jízdním pohodlí, tj. bez většího vynaloženého lidského úsilí v uvedení soupravy do pohybu a při zachování komfortu jízdy. Úrovně asistence 0 a 9 zůstaly nezměněny. Při volbě Assist 0 ovládací jednotka nepouští do elektromotoru žádný proud, a tak je funkce elektrické dopomoci zcela vyrušena. Elektrický velomobil se chová jako klasický velomobil bez elektrické asistence. Při zvolení stupně Assist 9 je v jednotce nastaven maximální přípustný výkon a nejvyšší dosažitelná rychlost na 25 km/h, jež je stanovena legislativou Evropské Unie. Tato možnost je volena v případech, kdy jezdec z jakéhokoliv důvodu potřebuje využít plný potenciál tohoto typu dopravního prostředku.

| Assist levels | Current Limit [%] | Speed Limit [%] |
|---------------|-------------------|-----------------|
| Assist 0: | 0 | 0 |
| Assist 1: | 15 | 15 |
| Assist 2: | 20 | 25 |
| Assist 3: | 25 | 40 |
| Assist 4: | 30 | 60 |
| Assist 5: | 45 | 80 |
| Assist 6: | 60 | 90 |
| Assist 7: | 75 | 100 |
| Assist 8: | 80 | 100 |
| Assist 9: | 100 | 100 |

Obr. 32 Úrovně dopomoci Nastavení 3

Tab. 16 Dosažené hodnoty elektromotoru na rovině bez zátěže

| | Při rozjezdu [W] | V ustálení [W] | Max. rychlost [km/h] |
|-----------------------|------------------|----------------|----------------------|
| Assist 4 / Rychlost 4 | 120 | 80 | 12 |
| Assist 4 / Rychlost 8 | 160 | 120 | 15 |
| Assist 8 / Rychlost 4 | 240 | 80 | 12,3 |
| Assist 8 / Rychlost 8 | 320 | 240 | 17,5 |

Tab. 17 Dosažené hodnoty elektromotoru na rovině se zátěží

| | Při rozjezdu [W] | V ustálení [W] | Max. rychlost [km/h] |
|-----------------------|------------------|----------------|----------------------|
| Assist 4 / Rychlost 4 | 160 | 120 | 9,8 |
| Assist 4 / Rychlost 8 | 220 | 140 | 13,2 |
| Assist 8 / Rychlost 4 | 240 | 80 | 10 |
| Assist 8 / Rychlost 8 | 380 | 240 | 15,2 |

Tabulky číslo 16 a 17 zaznamenávají změnu hodnot výkonu motoru při přidání zátěže oproti nezatíženému stavu.

Naměřené hodnoty ukazují, že výkon od motoru se zvedl při zvýšení zátěže velomobilu a zároveň se snížila dosažená rychlost ve všech případech. Tento jev nastal poprvé až u Nastavení 3. U předchozích zkoušek byl rozdíl rychlostí mezi zatíženým a nezatíženým stavem minimální.

Tab. 18 Dosažené hodnoty v kopci bez zátěže

| | Při rozjezdu [W] | V ustálení [W] | Max. rychlost [km/h] |
|-----------------------|------------------|----------------|----------------------|
| Assist 4 / Rychlost 1 | 160 | 120 | 3,2 |
| Assist 8 / Rychlost 1 | 280 | 220 | 5 |

Tab. 19 Dosažené hodnoty v kopci se zátěží

| | Při rozjezdu [W] | V ustálení [W] | Max. rychlost [km/h] |
|-----------------------|------------------|----------------|----------------------|
| Assist 4 / Rychlost 1 | 200 | 140 | 2,8 |
| Assist 8 / Rychlost 1 | 280 | 240 | 4 |

Výsledky měření testu Nastavení 3 ve stoupání 8 % ukazují tabulky číslo 18 a 19. Z hodnot lze vidět závislost mezi hodnotami v zatíženém a nezatíženém stavu s hodnotami z testu v daném stoupání. Při porovnání testů v kopci s předchozími testy lze vidět pokles hodnot ve všech buňkách. Při použití tohoto nastavení ve stoupání v zatíženém stavu je omezení proudu příliš velké a motor nemá dostatečný výkon.

DISKUSE

Z Nastavení 1, které bylo koncipováno pro vyšší dosahované výsledky, lze vyvodit závěr, že pro plynulou a bezpečnou jízdu v provozu jsou nízké asistenční stupně nevyhovující. Vysoké proudy, které jednotka pouští do elektromotoru v prvních asistenčních úrovních, způsobují při potřebě pomalého přesunu například mezi lidmi, vysokou akceleraci a tím zvýšenou nutnost pohotovosti pro brždění. Z Nastavení 2, ve kterém byly sníženy limity výkonu motoru a maximální dosažitelné rychlosti, vyplynulo lepší ovládání, snížení výkonu motoru při zachování stejné dosažitelné rychlosti a zvýšení dojezdu. Pro Nastavení 3 byly voleny ještě nižší hodnoty než u Nastavení 2, které se ukázaly jako nedostatečné. Při porovnání Nastavení 3 s Nastaveními 1 a 2 lze vidět, že jízda v nezatíženém stavu má velice podobné výsledky z hlediska dosažené rychlosti i při dodání menšího výkonu od elektromotoru a snížení spotřeby. V zatíženém stavu je jasné zvýšení hodnot, dochází zde k jasnému snížení rychlostí. Z toho lze soudit, že pro zatížený stav je proud protékající elektromotorem nedostatečný a pohonný trakt nemá dostatečný výkon.

Jako reálné řešení by byla kombinace hodnot z Nastavení 1 a 2 do jednoho celku. Ideálního naladění bych docílil kombinací hodnot z úrovně asistence 0 až 5, které by byly použity z Nastavení 2, pro použití v hustém provozu bez nutnosti dosažení velkých rychlostí a pružné akcelerace. Druhá část hodnot by byla převzata z úrovně asistence 6 až 9 z Nastavení 1 při potřebě zvýšeného výkonu od motoru při nutnosti pružné akcelerace, vyšších rychlostí nebo při přepravě zvýšené hmotnosti. Pro pestřejší záznam z měření by bylo vhodné vybavit elektromotor senzorem teploty, aby bylo zřejmé, jaké prostředí elektromotor zvládá a jaké už pro něj není vhodné.

| Basic Pedal Assist Throttle Handle | | |
|------------------------------------|--------------------------|------------------------|
| Low Battery Protection [V]: | 31 | |
| Current Limit [A]: | 18 | |
| Assist levels | Current Limit [%] | Speed Limit [%] |
| Assist 0: | 0 | 0 |
| Assist 1: | 20 | 12 |
| Assist 2: | 27 | 30 |
| Assist 3: | 35 | 40 |
| Assist 4: | 40 | 60 |
| Assist 5: | 60 | 100 |
| Assist 6: | 70 | 100 |
| Assist 7: | 80 | 100 |
| Assist 8: | 90 | 100 |
| Assist 9: | 100 | 100 |
| Speed Meter Type: | External, Wheel Meter | |
| Speed Meter Signals: | 1 | |
| Wheel Diameter [Inch]: | 20 | |

Obr. 33: Návrh nastavení ovládací jednotky

ZÁVĚR

Práce zachycuje přehled pohonného traktu elektrokola a jejich alternativ jako jsou lehokola či velomobily. Elektrokola mohou mít různá provedení v uspořádání komponentů pohonného traktu. Nejvhodnější koncepcí je použití centrálního elektromotoru s akumulátorem umístěným na spodní rámové trubce. Výhoda provedení je v celkovém rozložení váhy soustavy, proto přináší dobré jízdní vlastnosti.

Zdroje elektrické energie pro pohon elektrokola prošly vývojem. Historický olověný akumulátor byl pro svou hmotnost nahrazen niklovými systémy, který mají nižší hmotnost, ale trpí negativními jevy, například paměťový efekt. V současné době akumulátory elektrických kol obsahují lithium. Lithiové systémy vynikají vysokou odolností vůči špatnému zacházení a teplotním skokům. Ideální akumulátor pro elektrokola se jeví v Li-ion s konstrukcí malého rozměru, nabízející vysoký dojezd.

Softwaru Bafang Config Tool se používá pro konfiguraci a programování řídicích jednotek centrálních elektromotorů BBS. Vstupní hodnoty vložené do softwaru definují nastavení motoru, limitují jeho výkon, velikost dopomoci a celkové chování při šlápnutí do pedálů. Provedená nastavení byla otestována a zhodnocena. Výsledkem měření bylo provedení návrhu nastavení ovládací jednotky elektromotoru, které splňuje požadavky běžného uživatele daného dopravního prostředku. Testování a optimalizace hodnot řídicí jednotky je důležitým aspektem při návrhu správného provedení hodnot řídicí jednotky. Každý konstrukční typ vyžaduje individuální průběh testování v podmínkách, ve kterých se předpokládá jeho provoz pro dosažení nejvyšších výsledků pro danou konfiguraci.

Elektricky asistované dopravní prostředky obecně slouží pro plnění lidských potřeb v dopravě, ať už se jedná o pomoc při velikých stoupání, dopomoci v lidském omezení nebo špatné kondici anebo umožňují převážet těžší předměty na větší vzdálenost za vynaložení menšího úsilí.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] HRUBÍŠEK, Ivo. *Elektrokola: nová dimenze cyklistiky*. Plzeň: Cykloknihy, 2011. ISBN 978-80-87193-18-1.
- [2] CENEK, Miroslav. *Akumulátory a baterie*. 1. vyd. Praha: STRO. M, 1996. 149 s. Elektro; Sv. 30.
- [3] TREK. Základy-elektrokola. *TREK* [online]. 2023 [cit. 2024-01-16]. Dostupné z: https://www.trebikes.com/cz/cs_CZ/ebike_faq/
- [4] JEDEME VŠICHNI. Legislativa EU §§§§§. *Jedeme všichni* [online]. 2023 [cit. 2024-01-14]. Dostupné z: <https://www.jedemevsichni.eu/e-kola-a-vse-onich/legislativa-eu/>
- [5] BOSCH EBIKE SYSTEMS. Legislativa. *E-kolo-praha.cz* [online]. 2018 [cit. 2024-01-11]. Dostupné z: <https://www.e-kolo-praha.cz/legislativa/>
- [6] EKYKLISTIKA.CZ. BATERIE JE DUŠÍ ELEKTROKOLA. *ECYKLISTIKA.CZ* [online]. 2019 [cit. 2024-01-24]. Dostupné z: <https://www.ecyklistika.cz/vse-o-elektrokolech/o-bateriich-a-nabijeni-elektrokol/>
- [7] NOSIČOVÁ BATERIE. *Hardsport* [online]. 2022 [cit. 2024-02-07]. Dostupné z: <https://www.hardsport.cz/poradna/elektrokola/umisteni/>
- [8] ROZDĚLENÍ BATERÍ PODLE UMÍSTĚNÍ NA ELEKTROKOLE. In: *ECYKLISTIKA.CZ* [online]. 2019 [cit. 2024-02-02]. Dostupné z: <https://www.ecyklistika.cz/vse-o-elektrokolech/o-bateriich-a-nabijeni-elektrokol/>
- [9] TIVIS. *Elektrokola: Umístění motoru a baterie* [online]. 2022 [cit. 2024-02-02]. Dostupné z: <https://www.tivis.cz/novinky/detail-clanku-180-elektrokola-umisteni-motoru-a-baterie>
- [10] SUCHAN, Ladislav. Typy elektrokol a druhy pohonů. *Koloshop s.r.o.* [online]. 2021 [cit. 2024-02-02]. Dostupné z: <https://www.idomestik.cz/magazin/typy-elektrokol-a-druhy-pohonu>
- [11] ROZDĚLENÍ MOTORŮ PODLE ULOŽENÍ NA ELEKTROKOLE. In: *ECYKLISTIKA.CZ* [online]. 2022 [cit. 2024-02-02]. Dostupné z: <https://www.ecyklistika.cz/vse-o-elektrokolech/o-motorech-elektrokol/>
- [12] Motor v zadním kole-nábojový motor. *Ekolo.cz* [online]. 2022 [cit. 2024-02-02]. Dostupné z: <https://ekolo.cz/jaky-typ-motoru-pro-elektrokolo>
- [13] KOUKAL, Mike. Středový motor. *Zeus Bike* [online]. 2022 [cit. 2024-02-02]. Dostupné z: <https://www.zeusbike.cz/blog/motory-pro-elektrokola---vepredu--vzadu--nebo-uprostred/>

- [14] ÚŽDIL, Jiří. Testovali jsme skrytý motor. *Cykloservis* [online]. 2016 [cit. 2024-02-02]. Dostupné z: <https://cykl.cz/testovali-jsme-skryty-motor>
- [15] PETERS, Adele. This Kit Hides A Secret Electric Motor In Your Own Bike. In: *Fast Company* [online]. 2014 [cit. 2024-02-02]. Dostupné z: <https://www.fastcompany.com/3030676/this-kit-hides-a-secret-electric-motor-in-your-own-bike>
- [16] SLAVÍK, Jakub. Víte, jak funguje baterie? *Proelektrotechniky.cz* [online]. 2012 [cit. 2024-02-07]. Dostupné z: [\[https://www.proelektrotechniky.cz/vzdelavani/17.php\]](https://www.proelektrotechniky.cz/vzdelavani/17.php)
- [17] SÉRIOVÉ ZAPOJENÍ A PARALELNÍ ZAPOJENÍ - V TOMTO SPOČÍVÁ ROZDÍL. *Banner* [online]. 2022 [cit. 2024-02-07]. Dostupné z: <https://www.bannerbatterien.com/cz/Znalosti/5-S%C3%A9riov%C3%A9-a-paraleln%C3%AD-zapojen%C3%AD>
- [18] Vše o bateriích pro elektrokola. *Ekolo.cz* [online]. 2007 [cit. 2024-02-07]. Dostupné z: <https://ekolo.cz/baterie-elektrokola>
- [19] Lead-acid battery. In: *CHEMISTRY GLOSSARY* [online]. 2022 [cit. 2024-02-07]. Dostupné z: <https://glossary.periodni.com/glossary.php?en=lead-acid+battery>
- [20] TUTROVÁ, Jaromíra. Sulfatace. *Tutr* [online]. 2020 [cit. 2024-02-07]. Dostupné z: <https://www.tutr.cz/slovník/sulfatace>
- [21] Desulfatace. *STILL* [online]. 2023 [cit. 2024-02-07]. Dostupné z: <https://desulfatace.still.cz/>
- [22] What is a Sulfated Battery and How to Prevent It. In: *CROWN BATTERY* [online]. 2017 [cit. 2024-02-07]. Dostupné z: <https://www.crownbattery.com/news/sulfation-and-battery-maintenance>
- [23] JAKUBEC, David. NiCd Nikl-kadmiový akumulátor. *Battery Charger CZ* [online]. 2009 [cit. 2024-02-07]. Dostupné z: https://www.bch-battery.cz/NiCd-Nikl-kadmiovy-akumulator-a11_14.htm
- [24] BAYTALON, Jakub. CO JE PAMĚŤOVÝ EFEKT BATERIE? *Vseprolesaky.cz* [online]. 2023 [cit. 2024-02-07]. Dostupné z: <https://www.vseprolesaky.cz/clanek/22/co-je-pametovy-efekt-baterie/>
- [25] Co je paměťový efekt – povídá se, že... *Velofiala.cz* [online]. 2022 [cit. 2024-02-07]. Dostupné z: <https://www.velofiala.cz/n/co-je-pametovy-efekt-povida-se-ze>

- [26] JAKUBEC, David. NiMH Nikl-metal hydridový akumulátor. *Battery Charger CZ* [online]. 2009 [cit. 2024-02-07]. Dostupné z: https://www.bch-battery.cz/NiMH-Nikl-metal-hydridovy-a11_15.htm
- [27] STEHLÍK, Luděk. Rozdělení podle použití NiMH akumulátorů. *BATTEX* [online]. 2009 [cit. 2024-02-07]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nimh-akumulatory/rozdeleni-podle-pouziti-nimh-akumulatoru>
- [28] Systémy pro skladování energie (SSE) na bázi Li-Ion. *IfTECH* [online]. 2020 [cit. 2024-02-07]. Dostupné z: <https://shop.iftech.cz/cs/content/7-bateriove-systemy>
- [29] LI, Binke, Jianqi XIAO, Zhuoyan WU, Xushan ZHANG, Yu HAN, Jin NIU a Feng WANG. Enabling high-performance lithium iron phosphate cathodes through an interconnected carbon network for practical and high-energy lithium-ion batteries. *Journal of Colloid and Interface Science* [online]. 2023, 2023, 942-948 [cit. 2024-02-13]. ISSN 0021-9797. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021979723018313>
- [30] JAKUBEC, David. Lithiové baterie – LiFePO₄. *Battery Charger CZ* [online]. 2009 [cit. 2024-02-13]. Dostupné z: https://www.bch-battery.cz/Lithiove-baterie-LiFePO4-c1_333_2.htm
- [31] Structure Of Lithium Cells. In: *ELB Energy Group* [online]. 2021 [cit. 2024-02-13]. Dostupné z: <https://www.ecolithiumbattery.com/wp-content/uploads/2022/08/LiFePO4-Prismatic-Cells-Structure.jpg>
- [32] GEROLD, Eva, Reinhard LERCHBAMMER a Helmut ANTREKOWITSCH. Towards a sustainable approach using mineral or carboxylic acid to recover lithium from lithium iron phosphate batteries. *Hydrometallurgy* [online]. 2023, 2023(106187) [cit. 2024-02-13]. ISSN 0304-386X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304386X2300169X>
- [33] Lithium-iontová baterie – vše, co o ní potřebujete vědět. *Levne-Baterky.cz* [online]. 2021 [cit. 2024-02-13]. Dostupné z: <https://www.levne-baterky.cz/Lithium-iontova-baterie-vse-co-o-ni-potrebuje-vedet-b81853.htm>
- [34] Průvodce bezpečným skladováním Li-Ion baterií. *DENIOS* [online]. [cit. 2024-02-13]. Dostupné z: <https://www.denios.cz/servis/denios-know-how/pruvodce-bezpecnym-skladovanim-li-ion-baterii>
- [35] SHEPARD, Jeff. The difference between lithium ion and lithium polymer batteries. *Battery Power Tips* [online]. 2021 [cit. 2024-02-13]. Dostupné z: <https://www.batterypowertips.com/difference-between-lithium-ion-lithium-polymer-batteries-faq/>

- [36] Nevýhody lithium-iontového akumulátoru (Li-ion). *TME* [online]. 2021 [cit. 2024-02-13]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/news/library-articles/page/44796/typy-a-druhy-akumulatoru-li-ion-akumulator-ni-mh-akumulator-li-po-akumulator/>
- [37] PAVLIS, Jakub. Li-Pol akumulátory - proč se nejpokročilejší technologie neprosazuje. *NOTEBOOK.cz* [online]. 2011 [cit. 2024-02-13]. Dostupné z: <https://notebook.cz/clanky/technologie/2011/Li-Pol-akumulatory>
- [38] FREI, Martin. Lithium nakupujeme od Číňanů, ale použité končí na skládce. Recyklace se nevyplatí. *Aktuálně.cz* [online]. 2020 [cit. 2024-02-13]. Dostupné z: <https://zpravy.aktualne.cz/ekonomika/auto/lithium-nakupujeme-od-cinanu-ale-pouzite-konci-na-skladce-re/r~62c166ecb15911ea842f0cc47ab5f122/>
- [39] Použité lithium-iontové baterie. In: *EPA* [online]. 2021, 2024-01-03 [cit. 2024-02-13]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-03/lifecycleimagebatteries.png>
- [40] Velomobil. In: *Wikipedie* [online]. 2006 [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Velomobil#/media/Soubor:Doorzich1.jpg>
- [41] Trimtab3X3 Human Powered Vehicle. In: *Pixel And Timber* [online]. 2019 [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: <https://images.squarespace-cdn.com/content/v1/580adf62d482e96eafe02dc3/1594082636526-9TBKKIHY6ECUJ8QS0KW2/Trimtab-Redux.jpg?format=1500w>
- [42] MODER, Christoph a Tony GRANT. Velomobile Knowledge Base. In: *Velomobile Knowledge Base* [online]. 2022 [cit. 2024-04-22]. Dostupné z: https://anotherkiwi.gitlab.io/velomobil-grundwissen/velomobile_knowledge.html
- [43] ROSSI, Katrina. Everything you need to know about Velomobiles. In: *Velosurance* [online]. 2023 [cit. 2024-04-22]. Dostupné z: <https://velosurance.com/blog/everything-know-about-velomobiles/>
- [44] Opravdu TERÉNNÍ lehokolo !!! In: *NaKole.cz* [online]. 2023 [cit. 2024-05-07]. Dostupné z: <https://www.nakole.cz/images/f/diskuse/0e/1/1137899-2.jpg>
- [45] Pohonná jednotka Bafang BBS-01 Drive Unit. *Elektrokola s.r.o.* [online]. 2009 [cit. 2024-05-07]. Dostupné z: https://www.elektrokolasro.cz/10166,cz_pohonna-jednotka-bafang-bbs-01-drive-unit.html
- [46] Akumulátor Li-ion 36V, 20,4Ah Molicel Shark. *EbikeStore.cz* [online]. 2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.ebikestore.cz/akumulator-li-ion-36v--20-4ah-molicel-shark/>

- [47] BLDC MOTOR 250W/36V BASE PŘEDNÍ. *E-pohon.cz* [online]. 2022 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: <https://www.e-pohon.cz/bldc-motor-250w-36v-base-predni.html>
- [48] BLDC MOTOR 1000W/48V. *E-pohon.cz* [online]. 2022 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: <https://www.e-pohon.cz/bldc-motor-750w-36v-1000w-48v-predni.html>
- [49] 8FUN 250W/36V. *E-pohon.cz* [online]. 2022 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: <https://www.e-pohon.cz/stredovy-motor-8fun-250w-36v-bez-prislusenstvi.html>
- [50] 8FUN BBS03 1000W/48V. *E-pohon.cz* [online]. 2022 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: <https://www.e-pohon.cz/konverzni-kit-8fun-bbs03-1000w-48v-stredovy-68mm-bez-prislusenstvi.html>
- [51] Fazua Ride 60. *Akumo.cz* [online]. 2024 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: <https://www.akumo.cz/clanek/68/fazua-ride60-stredovy-motor/#motor>
- [52] Bez-převodový nábojový motor. In: *Zeus bike* [online]. 2022 [cit. 2024-05-23]. Dostupné z: <https://cdn.myshoptet.com/usr/606434.myshoptet.com/user/documents/upload/mceclip5-1.jpg?1697188496>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

| | | |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| <i>E</i> | [Wh] | Energie |
| <i>I</i> | [A] | Proud |
| <i>inch</i> | ["] | Palec |
| <i>LiFePo4</i> | [-] | Lithium-železo-fosfát |
| <i>Li-ion</i> | [-] | Lithium-iont |
| <i>Li-pol</i> | [-] | Lithium-polymer |
| <i>m</i> | [kg] | Hmotnost |
| <i>NiCd</i> | [-] | Nikl-kadmium |
| <i>NiMH</i> | [-] | Nikl-metalhydrid |
| <i>P</i> | [W] | Výkon |
| <i>Pb</i> | [-] | Olovo |
| <i>PbO₂</i> | [-] | Oxid olovičitý |
| <i>Q</i> | [Ah] | Kapacita |
| <i>t</i> | [°C] | Teplota |
| <i>U</i> | [V] | Napětí |
| <i>v</i> | [ms ⁻¹] | Rychlost |
| <i>ρ</i> | [kg·m ⁻³] | Hustota |