



Středoškolská technika 2025

Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT

SESTAVNÍ ELEKTROKOLOBĚŽKY

Valérie Hořejší

Gymnázium Jana Nerudy

Hellichova 3/457, Praha 1

Gymnázium Jana Nerudy



Studentská ročníková práce

Sestavení elektrokoloběžky

Předmět: Fyzika

Třída: 5.B

Jméno studenta: Valérie Hořejší

Vedoucí práce: Mgr. Zdeněk Plášek

2025

Prohlášení

Prohlašuji,

že jsem tuto kvalifikační práci vypracoval/a zcela samostatně a veškerou použitou literaturu a další podkladové materiály, které jsem použil/a, uvádím v seznamu literatury a že svázaná a elektronická podoba práce je shodná.

Datum _____

Podpis _____

Poděkování

Ráda bych poděkovala Mgr. Zdeňku Pláškoví za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování ročníkové práce.

Abstrakt

Tato ročníková práce se věnuje návrhu a konstrukci elektrokoloběžky, jejímž cílem je nabídnout vyvážený poměr mezi cenou a výkonem a přiblížit se svými parametry běžně dostupným komerčním modelům. V první části práce jsou analyzovány klíčové komponenty (motor, baterie, řídicí jednotka) a na jejich základě je sestaven technický návrh. Následně jsou pomocí fyzikálně-technických výpočtů (dojezdu, točivého momentu, maximální rychlosti) odhadnuty teoretické parametry vozidla. Ve finální části je realizován funkční prototyp, který prochází praktickým testováním, jehož výsledky jsou porovnány s teoretickými výpočty. Práce tak přináší nejen kompletní návrh, ale i jeho ověření v reálném provozu.

Klíčová slova

Elektrokoloběžka, elektrický motor, řídicí jednotka, li-on baterie, výpočty vlastností vozidla

Obsah

Úvod.....	8
1 Teoretická část	9
1.1 Komerčně vyráběné elektrické koloběžky	9
1.2 Komponenty pro elektrokoloběžku.....	10
1.2.1 Motor.....	11
1.2.2 Baterie	12
1.2.3 Řídící jednotka	14
1.2.4 Rám koloběžky.....	14
2 Praktická část	15
2.1 Výběr komponent.....	15
2.1.1 Výběr motoru	15
2.1.2 Výběr baterie	16
2.1.3 Výběr řídící jednotky	16
2.1.4 Výběr rámu.....	17
2.2 Sestavení elektrokoloběžky.....	18
2.2.1 Úprava rámu.....	18
2.2.2 Instalace pohonného systému.....	18
2.3 Výpočet jízdních vlastností	20
2.3.1 Výpočet hmotnosti koloběžky a celkové hmotnosti.....	20
2.3.2 Výpočet maximální rychlosti	21
2.3.3 Výpočet otáček za minutu	22
2.3.4 Výpočet točivého momentu	22
2.3.5 Výpočet dojezdu.....	22
2.4 Testy a komentář	24
2.4.1 Test maximální rychlosti.....	24
2.4.2 Test maximálního dojezdu při uživatelské rychlosti.....	24
2.4.3 Komentář.....	25
Závěr	26
Použité zdroje.....	27

Úvod

Elektrokoloběžky v posledních letech zaznamenaly výrazný nárůst popularity a stávají se stále běžnější součástí městské mobility. Jsou využívány jako alternativní dopravní prostředek, mohou nahradit cestu na kole do práce nebo cestu hromadnou dopravou. Obzvlášť praktické mohou být ve městech, kdy v dopravních špičkách je přeprava automobilem v podstatě nemyslitelná. Jejich výhodou je bezpochyby ekologičnost, snadná skladovatelnost a používání a skutečnost, že nevyžadují řidičský průkaz. Jejich pořizovací cena a následné provozní náklady jsou také nižší než při jízdě autem nebo motocyklem.

Pro výběr vhodné elektrokoloběžky je žádoucí sledovat její parametry, jako je výkon, kapacita baterie, váha nebo cena. Na trhu je mnoho typů koloběžek, některé jsou určeny pro jízdu v terénu, jiné pro jízdu ve městě apod. Jednotlivé koloběžky bývají nejčastěji kompromisem zmiňovaných parametrů. V případě konkrétnější představy souboru specifických vlastností koloběžky, lze si ji nechat sestavit “na míru”.

1 Teoretická část

1.1 Komerčně vyráběné elektrické koloběžky

Na trhu je řada výrobců elektrických koloběžek. Jak je patrné z dostupné literatury, každý výrobce nabízí trochu jinou konfiguraci, přičemž rozdíly mezi nimi lze vidět v použitých materiálech rámu, motorů nebo třeba baterií. Nejvýznamnějšími českými výrobci v této oblasti jsou Kostka, Mamibike, M-I-BO a Nitro Scooters. Z nejprodávanějších zahraničních výrobců jsou to např. Segway nebo Xiaomi. Xiaomi je nejoblíbenější značkou koloběžek v České republice, a proto je na ulicích nejčastěji k vidění.

(1) (2) (3) (4) (5)

	Aerium T350 PRO	Xiaomi Electric Scooter 5 Pro	Kugoo Kirin G2 2024	Kugoo Kukirin G4
cena	10.990 Kč	13.599 Kč	13.075 Kč	23.999 Kč
výkon	350 W	400 W	800 W	2000 W
kapacita baterie	10,5 Ah	10,2 Ah	15 Ah	20 Ah
dojezd	35 km	60 km	55 km	75 km
hmotnost	12,5 kg	22,4 kg	26 kg	37 kg

1.2 Komponenty pro elektrokoloběžku

Elektrické koloběžky se skládají z mnoha dílů, jejichž množství se může u různých typů skútrů značně lišit. Vždy je tu ale ústřední pětice komponent, které nemohou chybět žádné elektrokoloběžce.

Základní konstrukční prvek, dále označovaný jako „rám“, je zodpovědný za zajištění nezbytné podpory pro provoz vozidla. V tomto rámu nebo na něm jsou umístěny další součásti.

Dalším klíčovou součástí je elektrický pohon koloběžky, elektromotor. Tento motor může mít různou výkonnost nebo různé zabudování. U komerčně vyráběných koloběžek se nejčastěji nachází v předním kole.

Další stěžejní součástí je baterie, kdy opět existují výrazné rozdíly v kapacitě baterie mezi konkrétními modely koloběžek.

Neméně podstatnou součástí je řídicí jednotka, která zařizuje správnou komunikaci mezi komponenty. K řídicí jednotce je připojen otočný akcelerátor, vybavený informačním panelem, který zajišťuje ovladatelnost vozítka.

Kombinace těchto součástí má zásadní vliv na vlastnosti elektrického skútru a tento článek se bude zabývat především jimi. (6)

Existuje mnoho možností, jak si pořídit elektrokoloběžku. Tím nejjednodušším je, vybrat si koloběžku z široké nabídky renomovaných prodejců, jako je např. Xiaomi a dalších.

Druhou možností je, vybrat si konkrétní díly nebo komponenty a nechat si elektrokoloběžku sestavit u specializovaných výrobců. Tato metoda je vhodná pro uživatele, kteří mají přesnou představu o požadovaných jízdních vlastnostech, i když je zpravidla nákladnější než první postup.

Další možností je přestavba již zakoupené elektrické koloběžky, k dispozici jsou sady, které obsahují komplexní návod na provedení této úpravy v domácích podmínkách.

Poslední možností je sestavení si koloběžky od základů, vlastními silami, nebo na objednávku u dodavatele. Tento způsob může být velmi radikální, příkladem může být rám vytisknutý 3D tiskem, ručně vyrobený „battery pack“ z bateriových článků, elektromotor pohánějící řetězový převod atd. Tento radikální přístup sice poskytuje značnou flexibilitu, ale je náročný na dílenské náčiní a pro úspěšné zvládnutí vyžaduje značnou míru zkušeností. (7)

V případě této práce byl zvolen jednodušší přístup, kdy byly pořízeny a následně spojeny jednotlivé předem smontované komponenty.

1.2.1 Motor

Jak vyplývá z názvu, rozdíl mezi “klasickou (odrážecí) koloběžkou” a “elektrickou koloběžkou/ elektrokoloběžkou” je, že u první varianty je nutné vyvinout vlastní sílu k pohybu, zatímco druhá je poháněna elektromotorem. Nejrozšířenějším typem motoru je bezkartáčový stejnosměrný motor, jinak označovaný jako BLDC (BrushLess Direct Current motor). (8)

Jeden z hlavních parametrů, který je u motoru sledován, je výkon, respektive otáčky motoru. Výkony motorů u výše uvedených prodejců se pohybují v rozsahu mezi 350W až 2000W, ale nejsou ojedinělé hodnoty jako je 250 W. Nicméně nejúspěšnější z hlediska prodeje jsou modely s výkonem mezi 350 W a 800 W. Využití jakéhokoli vyššího výkonu je znemožněno legislativou České republiky, která zakazuje prodej a používání elektrických koloběžek s vysokým výkonem vyšším než 1 kW. (9) (10) (11) (12)

Motory do elektrokoloběžek je možné pořídit jak v kamenných obchodech, tak v e-shopech.

1.2.1.1 Princip fungování BLDC motoru

Pro pochopení fungování BLDC motoru je dobré si ujasnit, jak funguje jeho předchůdce stejnosměrný motor neboli BDC (Brushed Direct Current).

BDC se skládá ze dvou hlavních částí: rotoru a statoru. Stator se skládá z permanentních magnetů. Na rotoru jsou připevněny cívky, které jsou připojeny ke komutátoru. Když je přiveden elektrický proud do obvodu, kartáče předávají proud komutátoru, přes který proteče až do cívek. Magnetické pole v cívkách reaguje s permanentními magnety a jejich elektromagnetické pole roztočí rotor. Jakmile se rotor otočí, komutátor automaticky přepne proud do jiných cívek, čímž se udržuje pohyb. Tento model má své nevýhody, například rychlejší opotřebení kartáčů, nižší účinnost nebo vyšší hlučnost v důsledku tření mezi kartáči a komutátorem.

Proto se v elektrokoloběžkách zpravidla používá BLDC, který funguje na podobném principu. V systému BLDC se permanentní magnet nachází na rotoru a cívky, které elektromagnetizují se nachází na statoru. Místo komutátoru s kartáči se používá regulátor ESC (Electric Speed Controller). Když je do obvodu zaveden proud, regulátor řídí přívod proudu ze statoru k cívkám, kolem kterých se vytváří elektromagnetické pole, které roztáčí rotor s permanentním magnetem. Regulátor postupně přepíná proud mezi cívkami, aby se rotor plynule otáčel. Senzory (jako jsou Hallovy sondy) sledují polohu rotoru a pomáhají regulátoru řídit přepínání proudu mezi cívkami.

BLDC motory ve srovnání s BDC motory mají delší životnost, větší účinnost a jsou tišší.

Tyto vlastnosti najdou uplatnění právě i v elektrokoloběžkách, kde se BLDC motory nejčastěji používají ve formě Hub motoru (motor integrovaný přímo do kolečka). (13) (14) (15) (16)

1.2.2 Baterie

Baterie je klíčovou součástí každé elektrické koloběžky, protože určuje její dojezd, výkon a účinnost. Výběr vhodného bateriového systému má zásadní vliv na životnost a bezpečnost zařízení. V elektrických koloběžkách se používá nejčastěji jeden ze tří druhů baterií: Lithium-iontové (Li-Ion), Olovo-kyselinové (PbA) a Lithium-železo-fosfátové (LiFePO₄). Každý z těchto typů má své výhody a nevýhody. (17)

Lithium-iontové baterie vykazují nejvyšší energetickou hustotu (200–300 Wh/kg), což je vlastnost, která jim poskytuje možnost větší kompaktnosti a nižší hmotnosti při zachování stejné kapacity jako u ostatních typů baterií. Nabízí i minimální míru samovybíjení, což přispívá k prodloužení jejich skladovatelnosti. Mezi nevýhody těchto baterií patří jejich vyšší pořizovací cena ve srovnání například s bateriemi PbA a jejich náchylnost k přehřátí nebo poškození při nesprávném použití.

Olovo-kyselinové baterie jsou vyhledávané pro svoji nízkou pořizovací cenu a schopnost dodávat vysoký startovací proud. Nevýhodou těchto baterií je větší hmotnost a objem a nižší hustota energie (30-50 Wh/kg). Ve srovnání s lithium-iontovými bateriemi vykazují kratší životnost (300-500 cyklů) a vyšší úroveň samovybíjecího proudu.

Poslední kategorii tvoří **Lithium-železo-fosfátové baterie**, které jsou oblíbené pro svoji bezporuchovost a nenáročnost na údržbu, dlouhý cyklus životnosti (až 2000 cyklů) a stabilní napětí během vybíjení. Ve srovnání s ostatními typy však vykazují nejnižší elektrickou hustotu a nejvyšší cenu. (18) (19)

Pro tuto práci byl vybrán typ **Lithium-iontové** (zkráceně Li-Ion) baterie pro svoji skladnost a dostupnost.

Důležité při výběru baterie je, aby měla kompatibilní napětí s již vybraným motorem. Neméně důležitý je kontinuální proud neboli maximální stálý proud, který baterie dodává po delší dobu. Pokud by byl tento faktor zanedbán, může dojít ke zkrácení životnosti akumulátoru v důsledku výskytu vysokého proudu. Baterie se může samovypínat, zahřívat se, nebo dokonce se samovzněcovat. Tyto poruchy by mohly výrazným způsobem narušovat komfort jízdy. Naopak při nedostatečném trvalém proudu se snižuje výkon a následně i maximální rychlost.

Jedním z nejdůležitějších parametrů při výběru baterie je její kapacita, která přímo ovlivňuje dojezd. Ta se výrazně liší model od modelu koloběžky. Koloběžky, které používají motory s nízkým výkonem a nízkým napětím si často vystačí s bateriemi, které mají např 10Ah. Výkonnější městské elektrokoloběžky mívají baterie s kapacitou až 30Ah. Terénní cestovní koloběžky mívají často baterie, které mohou dosahovat kapacit až přes 50Ah.

S rostoucí kapacitou obvykle stoupá i cena společně s hmotností baterie, proto je dobré si udělat odhad jakého dojezdu by měla vyráběná elektrokoloběžka dosáhnout a podle toho určit jakou baterii zvolit.

Přibližně 90 % komerčně vyráběných koloběžek používá akumulátory neboli akupacky vyrobené z lithiových článků. Tyto články, které mají napětí kolem 3,6 V a kapacitu kolem 3200mAh, se pak zapojují paralelně nebo sériově, což nakonec určuje výsledné napětí a kapacitu.

(8) (17) (18) (20)

1.2.3 Řídicí jednotka

Řídicí jednotka funguje jako centrální výpočetní jednotka koloběžky, jak napovídá její označení. Zajišťuje správnou regulaci výkonu motoru, komunikaci s baterií a ovládacími prvky. Výběr vhodné jednotky má zásadní význam pro zajištění optimálního výkonu, bezproblémového provozu a bezpečnosti systému.

Řídicí jednotka se také označuje jako ECU (Electronic Control Unit). ECU hlavním úkolem je, monitorovat a zpracovávat vstupy ze senzorů nebo ovládacích prvků. Následně podle předem stanoveného algoritmu vypočítává a reguluje výstupy, které jsou poté realizovány dalšími součástmi, jako je motor nebo baterie.

Kromě toho shromažďuje údaje z Hallových snímačů zabudovaných v motoru, které dokumentují polohu rotoru. To usnadňuje přesnou regulaci fázování a otáček motoru. Datové vstupy do řídicí jednotky pocházejí také z baterie, konkrétně ze systému Battery Management System (BMS), který je zodpovědný za měření napětí, proudu, teploty a stavu baterie. (21)

Po obdržení těchto vstupů je ECU zodpovědná za jejich konverzi, analýzu a následné určení požadovaného výstupu.

Nejdříve se musí analogový signál (např. z motoru nebo plynu) převést na digitální hodnoty pomocí AD převodníku (Analog-to-Digital Converter, ADC), poté mikroprocesor porovná aktuální hodnoty se stanovenými limity (např. maximální povolený proud motoru). Následně ECU vypočítá odpovídající výstup (např. když jezdec otočí plynem, ECU vypočítá požadovaný výkon motoru na základě aktuální rychlosti, napětí baterie a dalších parametrů.)

Nakonec ECU určí, jaký výstup vytvoří a posílá signál akčním činitelům jako je motor nebo baterie. (8) (22)

1.2.4 Rám koloběžky

Rám koloběžky je základním prvkem, který nese ostatní komponenty. U koloběžkových rámu jsou vyžadované vlastnosti jako je hmotnost, poddajnost materiálu nebo pevnost, přičemž optimální kombinace těchto vlastností závisí na požadovaných jízdních vlastnostech. Kromě toho je nezbytné věnovat náležitou pozornost samotné konstrukci rámu, včetně takových parametrů, jako jsou rozměry řídítek, vidlice a délka a šířka náslapu. (8)

2 Praktická část

2.1 Výběr komponent

2.1.1 Výběr motoru

Pro realizaci projektu byl zvolen čínský e-shopový dodavatel AliExpress, a to primárně z důvodu široké dostupnosti komponent, uživatelských recenzí, možnosti porovnání parametrů a výrazně výhodnějšího poměru cena/výkon oproti evropským distributorům. I přes určitou míru rizika v oblasti kvality a logistiky (delší dodací lhůty, potenciální clo) se jedná o volbu běžnou v komunitě domácích konstruktérů, především díky možnosti získat technicky srovnatelné komponenty za zlomek ceny.

Konkrétně byl zvolen nábojový (hub) motor s následujícími parametry:

Výkon: 1000 W

Napětí: 48 V

Průměr ráfku: 11" (cca 28 cm)

Typ motoru: bezkartáčový stejnosměrný (BLDC), integrovaný do předního kola

Výhodou motoru s nábojovým řešením je konstrukční jednoduchost – motor je přímo integrován do kola, čímž odpadá nutnost vnější převodovky nebo řetězu, a snižuje se tak počet mechanicky namáhaných součástí.

Použití 11" ráfku zároveň zajišťuje příznivý kompromis mezi kompaktností celého stroje a dostatečným komfortem při překonávání nerovností. Po pečlivém výzkumu také bylo zjištěno, že vhodné rámové konstrukce dětských středně terénních koloběžek mívají kolečka s 12" ráfkem, tudíž bude zajištěna lepší kontabilita.

2.1.2 Výběr baterie

Pro napájení motoru byla zvolena Li-Ion baterie ve formě předem sestaveného „battery packu“, opět pořízená od čínského dodavatele přes platformu AliExpress (viz výše). Byla zvolena baterie složená z lithio-iontových článků (battery pack). Zvolená konfigurace baterie je 13s8p, tedy 13 článků sériově zapojeno (což odpovídá nominálnímu napětí 48,1 V) v 8 paralelních větvích, které dávají výslednou kapacitu.

Další parametry baterie:

Kapacita baterie: 28Ah

Napětí: 48 V až 54,6 V (plně nabito)

Kontinuální odběr proudu: 21 A

Typ článků: Li-Ion 18650

Baterie obsahuje zabudovaný BMS systém, který zajišťuje základní ochranné funkce proti přebití, podbití, nadproudu a přehřátí. Maximální vybíjecí proud BMS je 30 A, což poskytuje bezpečnostní rezervu vůči kontinuální zátěži motoru (cca 21 A při plném výkonu).

Díky paralelnímu zapojení osmi článků je zajištěna i dobrá proudová stabilita a tepelná odolnost – jednotlivé články nejsou přetěžovány ani při delším provozu na maximální výkon.

2.1.3 Výběr řídicí jednotky

Při výběru vhodné řídicí jednotky je nejdůležitější sledovat její kompatibilitu s již vybranými komponenty. Řídicí jednotka musí být navržena pro odpovídající napětí, výkon a maximální proud. Je klíčové, aby ECU zvládla pracovat s BMS systémem baterie a zároveň uměla komunikovat s BLDC motorem. Také je žádoucí, aby měla ochranné funkce proti přehřátí či zkratu.

Pro minimalizaci rizika nekompatibility byla řídicí jednotka zakoupena v sadě společně s otočným plynem. Tento postup garantuje, že komunikační protokoly a signálové úrovně budou vzájemně plně kompatibilní. Celá sada byla zakoupena od stejného dodavatele na platformě AliExpress, v souladu s výběrem ostatních komponentů.

Parametry řídicí jednotky:

jmenovitý proud: 25 A

jmenovité napětí: 50 V

spotřeba výkonu v aktivním režimu: <5 mA

motorová kompatibilita: BLDC

podporované systémy: BMS

ochranné funkce: přehřátí, přetížení, zkrat

2.1.4 Výběr rámu

Jak již bylo zmíněno (viz. výše) je několik možností, jak přistoupit k výběru vhodného rámu. Z důvodu zachování co nejpříznivějšího poměru cena/výkon bylo zvoleno řešení konfigurace neelektrické koloběžky. Po prostudování nabídky na trhu bylo zjištěno, že koloběžky s vidlicí na kolečko velikosti 11" se nejčastěji prodávají jako dětské.

Byla vybrána dětská koloběžka Arcone s kolečky 12", u které se provedly úpravy vidlice a posunutí trubkové vzpěry pod řídítka. Vidlice byla rozšířena, protože zmiňovaný motor měl příliš širokou osu. Trubkový systém byl upraven tak, aby se snadněji připevňovaly ostatní díly (baterie a řídicí jednotka).

Tyto úpravy byly provedeny za ochotné asistence automechanika z Libčic nad Vltavou, pana Vladimíra Přibáně.

2.2 Sestavení elektrokoloběžky

2.2.1 Úprava rámu

Protože jako základ pro elektrokoloběžku byl zvolen rám dětské koloběžky, který nebyl dokonale kompatibilní, bylo nutné udělat úpravy tak, aby odpovídal rozměrovým požadavkům nově instalovaných elektrických komponent.

2.2.1.1 Modifikace Rozšíření vidlice pro osazení kola s integrovaným motorem.

Motor byl umístěn místo předního kolečka, tudíž bylo potřeba upravit původní rozteč. Původní záchytný systém o šířce 95 mm byl nahrazen novým o šířce 125 mm, což je dostatečná velikost rozteče pro uchycení širšího náboje motoru. Tento invazivní způsob byl zvolen z důvodu, že pouhým roztáhnutím původní konstrukce by mohla být ohrožena bytelnost výsledného produktu. Během úprav bylo dbáno na zachování symetrie, pevnosti a bezpečnosti rámu.

2.2.1.2 Modifikace trubkové vzpěry pod řídítky

V rámci této úpravy byl prostor mezi dvěma trubkami mezi řídítky a nášlapnou plochou rozšířen a vyztužen za účelem instalace baterie. Baterie byla umístěna podélně mezi hlavní nosnou trubkou rámu a jistící trubkou rámu končící na nášlapné ploše. Díky této úpravě bylo zajištěno nižší těžiště a zlepšená stabilita koloběžky během jízdy. Na baterii byla přichycena montážní plocha umožňující pevné uchycení řídicí jednotky z boku.

Mezi jednu z hlavních výhod tohoto řešení patří snadná přístupnost pro případný servis, ale i dostatečná ochrana před mechanickým poškozením těchto dílů.

2.2.2 Instalace pohonného systému

2.2.2.1 Motor

Motor byl integrován do upravené vidlice předního kola. Připojení motoru bylo provedeno pomocí standardních konektorů kompatibilních s řídicí jednotkou. Vedení kabeláže bylo realizováno podél rámu s využitím ochranných hadic a stahovacích pásek, aby bylo minimalizováno riziko mechanického poškození při běžném provozu.

2.2.2.2 Baterie

Baterie byla fixována k rámu pomocí systému upínacích pásek a pryžových vložek, které zároveň slouží jako tlumiče vibrací. Vodiče z baterie byly propojeny s řídicí jednotkou přes bezpečnostní hlavní vypínač, umožňující rychlé odpojení napájení v případě poruchy. Z baterie je také vyveden vodič na napájení.

2.2.2.3 Řídící jednotka

Řídící jednotka (ECU) byla upevněna přímo nad baterií. Instalace byla provedena tak, aby bylo umožněno optimální chlazení přirozeným prouděním vzduchu při jízdě. Připojení mezi ECU a motorem, stejně jako propojení s akcelerátorem a BMS, bylo provedeno podle schématu dodávaného výrobcem.

2.2.2.4 Ovládací prvky

V tomto projektu je jediným ovládacím prvkem akcelerátor, ke kterému je výrobcem připojen displej. Na displeji se zobrazuje stav baterie, při jízdě rychlost, a když koloběžka není v pohybu displej ukazuje voltáž, napovídající přesný stav baterie a její opotřebenost.

Zároveň akcelerátor disponuje jisticím systémem proti krádeži v podobě malého klíčku.

Otočný plyn je umístěn na pravé straně řídítek. Všechny kabely vedené na řídítkách byly svázaný do kompaktního svazku a zajištěny proti mechanickému namáhání při manipulaci s řídítky.



2.3 Výpočet jízdních vlastností

Jízdní vlastnosti koloběžky závisí nejen na parametrech koloběžky samotné, ale i na vnějších podmínkách a proměnných. Pro zjištění jízdních vlastností byly provedeny přibližné výpočty momentu, otáček, rychlosti a dalších vlastností.

- Hmotnost jezdce: $m_{jezdce} = 75kg$

Toto jsou počáteční dané parametry od dodavatelů:

- Hmotnost rámu: $m_{rám} = 11kg$
- Hmotnost motoru: $m_{motor} = 5kg$
- Hmotnost baterie: $m_{baterie} = 4kg$
- Hmotnost řídicí jednotky: $m_{ECU} = 1kg$
- Hmotnost dalších komponent: $m_{doplňky} = 1kg$
- Výkon motoru: $P = 1000W$
- Průměr ráfku kola: $d = 11" = 28\text{ cm}$
- Napětí v obvodu: $U = 48V$
- Kapacita baterie: $C = 28Ah$

2.3.1 Výpočet hmotnosti koloběžky a celkové hmotnosti

Celková hmotnost koloběžky byla přibližně určena jako součet hmotnosti rámu, motoru, baterie, řídicí jednotky a dalších komponent, jako je rukojeť nebo brzdy. Hodnoty od výrobce byly zaokrouhleny na celá čísla.

$$m_{koloběžky} = m_{rám} + m_{motor} + m_{baterie} + m_{ECU} + m_{doplňky}$$

$$m_{koloběžky} = 11 + 5 + 4 + 1 + 1 = 22kg$$

$$m = m_{koloběžka} + m_{jezdce}$$

$$m = m_{rám} + m_{motor} + m_{baterie} + m_{ECU} + m_{doplňky} + m_{jezdce}$$

$$m = 11 + 5 + 4 + 1 + 1 + 75$$

$$m = 97kg$$

2.3.2 Výpočet maximální rychlosti

Pro výpočet maximální rychlosti v , byl zvolen vztah, ze kterého byla rychlost odvozena pomocí kvadratické rovnice. Výpočet počítá s 0% stoupáním a s jízdou po dokonalém asfaltu s nulovým protivětrém.

$$P = F_{odpor} \cdot v$$

$$v_{max} = \frac{P}{F_{odpor}}$$

$$v_{max} = \frac{P}{(F_{val} + F_{vzd})}$$

$$F_{val} = m \cdot g \cdot f \cdot \cos(\alpha)$$

$$F_{val} = 97 \cdot 9,81 \cdot 0,015 \cdot 1 = 14,27N$$

g -gravitační zrychlení ($g = 9,81 \text{ m/s}$), α -sklon vozovky v radiánech ($\alpha = 0^\circ$), f -součinitel valivého odporu asfaltu ($f = 0,015$) (8)

$$F_{vzd} = \frac{1}{2} \rho_{vzd} \cdot c_x \cdot S_x \cdot v^2$$

$$F_{vzd} = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 0,32 \cdot 0,756 = 0,1512 \cdot v^2$$

ρ_{vzd} – hustota vzduchu ($\rho_{vzd} = 1,25 \text{ kg/m}^3$), c_x – součinitel vzdušného odporu ($c_x = 0,32$),
 S_x – čelní plocha osoby na koloběžce (S_x bylo zvoleno přibližně $0,756 \text{ m}^2$) (8)

$$v_{max} = \frac{P}{(F_{val} + F_{vzd})}$$

$$v_{max} = \frac{1000}{14,27 + 0,1512 \cdot v^2} = \frac{16,1\text{m}}{\text{s}} = \frac{58\text{km}}{\text{h}}$$

Je třeba podotknout, že tato rychlost je ideální hodnota pro pohyb na rovinatém asfaltovém povrchu za optimálních podmínek (nulové stoupání, bez protivětru). V reálném provozu může být dosažená rychlost mírně nižší v důsledku kolísání výkonu, ztrát v převodech a zvýšeného odporu prostředí. Zároveň platí, že dosažená rychlost potvrzuje správnost dimenzování pohonu vzhledem ke konstrukčním možnostem rámu i bezpečnostním limitům použitých komponentů.

2.3.3 Výpočet otáček za minutu

$$n = \frac{v_{max} \cdot 60}{\pi \cdot d}$$

$$n = \frac{16,1 \cdot 60}{\pi \cdot 0,28} = 1098RPM$$

Tento údaj (cca 1100 ot/min) odpovídá typickým hodnotám pro bezpřevodové BLDC hub motory používané v elektrokoloběžkách střední výkonové třídy. Výpočet vychází z předpokladu přímého přenosu otáček motoru na kolo, bez jakýchkoli převodových redukcí, což odpovídá konstrukci zvoleného motoru.

2.3.4 Výpočet točivého momentu

$$M = \frac{P \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n}$$

$$M = \frac{1000 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 1098} = 8,75Nm$$

Výsledná hodnota 8,75 Nm představuje točivý moment na ose kola při plném zatížení. Tato hodnota je v kontextu konstrukce více než dostatečná pro rozjezd a udržení rychlosti při běžných jízdních odporech. Je třeba dodat, že tato hodnota reflektuje ideální stav při maximálním výkonu, zatímco v reálných podmínkách může být mírně snížena v důsledku ztrát (účinnost motoru, řídicí jednotky, BMS apod.).

2.3.5 Výpočet dojezdu

Pro odhad teoretické doby vybíjení baterie byl použit základní vztah vycházející z definice výkonu a kapacity akumulátoru.

$$t = \frac{E_{bat}}{P} = \frac{U \cdot C}{P}$$

Tento výpočet poskytuje ideální dobu vybíjení za předpokladu konstantního odběru výkonu a bez započtení ztrát na účinnosti, vnitřním odporu baterie a proměnlivých jízdních podmínek. Vztah předpokládá lineární chování systému, což je zjednodušení, ale pro základní orientaci a porovnání je tento model plně dostačující.

2.3.5.1 Dojezd koloběžky při 100 % výkonu

Tento výpočet je čistě orientační. Je nepravděpodobné, že jezdec pojede soustavně na maximální výkon po delší časový úsek.

$$t_{100\%} = \frac{48 \cdot 28}{1000} = 1,334h = 80,64min$$

Je třeba zdůraznit, že ve skutečnosti bude reálná doba provozu kratší z důvodu ztrát na účinnosti motoru (obvykle kolem 80-90 %), řídicí jednotky a dalších prvků pohonu, jakož i kvůli omezením řízení vybíjení baterie systémem BMS.

$$s = v \cdot t$$

$$s_{100\%} = 58 \cdot 1,334 = 77,372km$$

2.3.5.2 Dojezd koloběžky při uživatelské rychlosti

Za průměrnou uživatelskou rychlost byla určena hodnota 20 km/h, což odpovídá klidné městské jízdě s minimem akcelerací. Tento přístup předpokládá, že odporové složky (zejména aerodynamický odpor) mají zanedbatelný vliv.

$$P_{20} = P \cdot \frac{V_{20km/h}}{V_{max}}$$

$$P_{20} = 1000 \cdot \frac{20}{58} = 344,8W$$

$$t_{20km/h} = \frac{E_{bat}}{P_{20}} = \frac{U \cdot C}{P_{20}}$$

$$t_{20km/h} = \frac{48 \cdot 28}{344,8} = 3,89h = 233,4min$$

$$s_{20km/h} = V_{20km/h} \cdot t_{20km/h}$$

$$s_{20km/h} = 20 \cdot 3,89 = 77,8km$$

Tento výsledek představuje čistě teoretický dojezd bez uvažování ztrát (např. odporů, zahřívání, účinnosti řídicí jednotky, reálné degradace článků apod.). Výpočet však dobře ilustruje maximální potenciál systému za ideálních laboratorních podmínek a slouží jako horní mez odhadu efektivity.

(8) (23) (24) (25)

2.4 Testy a komentář

Výpočty uvedené v předchozí části práce slouží jako základní odhad parametrů elektrokoloběžky při ideálních podmínkách, tedy za nulového odporu asfaltu a protivětru apod. Jde o modelovou situaci, která je sice fyzikálně konzistentní, ale od reálného provozu se často výrazně liší.

Z výpočtů vyplývá, že elektrokoloběžka s motorem o deklarovaném výkonu 1000 W, napájeným 48 V systémem a využívajícím 11palcová kola, by při zanedbání ztrát a při jízdě po rovině mohla dosáhnout teoretické maximální rychlosti přibližně 58 km/h. Při dané rychlosti a průměru kola pak byly dopočítány také otáčky motoru (cca 1098 ot/min) a odpovídající točivý moment přibližně 8,75 N·m.

Dále byla na základě kapacity baterie (28 Ah) a napětí systému (48 V) vypočítána teoretická doba vybití při maximálním výkonu, která činí zhruba 1,33 hodiny. Pokud by tedy koloběžka jela po celou dobu maximální rychlostí, dojezd by činil přes 75 km.

2.4.1 Test maximální rychlosti

Test maximální rychlosti byl proveden co nejblíže momentu 100% nabití, aby bylo zajištěno maximální napětí a tím i maximální otáčky. Test byl proveden na rovném asfaltovém povrchu a během testu byla věnována speciální pozornost bezpečnosti.

Test obsahoval 15 startů, přičemž maximální dosažená rychlost byla 51 km/h. Tato rychlost se dá označit za odpovídající výpočtům, protože v původním odhadu byly zanedbány proměnné jako je protivítr, nedokonalosti asfaltu a bylo počítáno s ideálním jezdcem.

2.4.2 Test maximálního dojezdu při uživatelské rychlosti

Jako test dojezdu byla provedena jízda po co nejrovnějším a nejdokonalejším asfaltu kolem Vltavy v Praze. Při průměrné jízdě rychlosti 20 km/h, byl naměřen reálný dojezd přibližně 40 km, tedy jen zlomek z předpokládaných 77,8 km. Pro tento výsledek, leč na první pohled neuspokojivý, se nabízí mnoho hypotéz, které by ho mohly vysvětlit.

2.4.2.1 Ztráty v systému, které byly opominuty

Teoretický model neuvažuje s elektrickými ztrátami ve vodičích, účinností řídicí jednotky (ECU) ani s tepelnými ztrátami motoru. Skutečná účinnost levnějších elektromotorů se často pohybuje mezi 70–85 %, přičemž další pokles přináší i samotná elektronika. I sériově zapojené články baterie vykazují vnitřní odpor a při dlouhodobě vyšším energetickém odběru, dochází k poklesu napětí i účinnosti celého systému. Tyto ztráty prudce narůstají se zátěží, čímž se teoretické výpočty výše stávají nespolehlivé zejména při akceleraci nebo jízdě do kopce.

Ovládací prvky nebyly nekalibrované přímo na sebe, tudíž otočný plyn je značně citlivý. To celé v kombinaci s vysokým zrychlením činí plynulou jízdu bez výrazných změn v rychlosti obtížnou. A během jízdy dochází k častému zrychlení a následné jízdě ze setrvačnosti, což napomáhá k rychlejšímu vybíjení baterie než bylo předpokládáno.

Při podobných výpočtech se často zanedbává časová dynamika jízdy, tedy že koloběžka se nerozjíždí okamžitě na maximální rychlost, ale střídá různé režimy: rozjezdy, zpomalování, zastavení na odpočinek apod. V těchto fázích jsou odběry z baterie výrazně vyšší, než odpovídá ustálenému pohybu.

2.4.2.2 *Nekonzistentní kvalita baterie a článků*

Výpočty pracují s údajem 28 Ah, který však vychází z teoretického maxima deklarovaného výrobcem baterie. V realu, zvláště u levnějších baterií z méně ověřených zdrojů (např. neznámé značky na Aliexpressu), to je případ této práce, může být skutečně využitelná kapacita nižší i o 20–30 %, což samo o sobě vysvětluje část rozdílu. Kapacita baterie navíc klesá se stářím, počtem cyklů i teplotou, a články nejsou dokonale identické, čili nejhorší určuje limit celého systému. Může se stát, že z deklarovaných 28 Ah je reálně využitelných pouze 22 Ah nebo méně. (26)

2.4.3 Komentář

Rozpor mezi teoretickým a skutečně dosaženým dojezdem tak není chybou výpočtu jako takového, ale spíše důsledkem jeho omezené vypovídací schopnosti. Pro dosažení cenové dostupnosti bylo nutné přistoupit na kompromisy v kvalitě komponent.

Zkonstruovaná elektrokoloběžka splňuje všechny představy a požadavky, které by průměrný jezdec mohl mít po podobné pojízdné elektrokoloběžce. Během testu se nevyskytly žádné komplikace, naopak koloběžka má velký tah a díky tomu například v kopcích hravě předjíždí konkurenci, ať na komerčně vyráběné koloběžce, tak například na elektrokole. Pro pohodlné používání maximální rychlost 50 km/h a dojezd 40 km je více než dostačující a výrazně převyšuje podobné manuálně vyráběné koloběžky ve stejné cenové kategorii (8 000 - 9 000 Kč).

Závěr

Tato práce měla za cíl sestavit pojízdnou elektrickou koloběžku, která by se vlastnostmi i cenou mohla měřit s ostatními sériově vyráběnými koloběžkami. Byl popsán klíč, podle kterého byly komponenty vybírány, zjednodušeně vysvětleno jejich fungování i jejich umístění na samotné elektrokoloběžce. V rámci praktické části byla sestavena funkční elektrokoloběžka která svými vlastnostmi dosahuje nebo převyšuje koloběžky v podobné cenové kategorii. Také byly provedeny výpočty teoretických parametrů, kterých by koloběžka měla dosahovat a následně proběhly praktické testy, které ukázaly rozpor mezi vypočítaným a reálným dojezdem. Práce také nabízí vysvětlení, proč k takovému rozdílu mohlo dojít.

Použité zdroje

1. HEUREKA.CZ. AERIUM čistička vzduchu s ionizátorem Pure Air Pro WiFi. [online]. [cit. 2025-05-04]. Dostupné z: <https://www.heureka.cz/exit/aerium-cz/5121674058/?z=2&p=5&tb=0>.
2. XIAOMI. Xiaomi Electric Scooter 5 Pro. [online]. Mi.com, 2025 [cit. 2025-05-04]. Dostupné z: <https://www.mi.com/global/product/xiaomi-electric-scooter-5-pro/>.
3. KUGOO. Kugoo Kirin G2 Pro 2024. [online]. Kugoo-scooter.com, 2025 [cit. 2025-05-04]. Dostupné z: <https://www.kugoo-scooter.com/products/kugoo-kirin-g2-pro-electric-scooter>.
4. KUKIRIN. Kugoo Kukirin G4 Electric Scooter. [online]. Kukirin.com, 2025 [cit. 2025-05-04]. Dostupné z: <https://www.kukirin.com/products/kukirin-g4-electric-scooter>.
5. DATART. Jak vybrat elektrokoloběžku. [online]. Datart.cz, 2024 [cit. 2025-05-04]. Dostupné z: <https://www.datart.cz/novinky/radce/jak-vybrat-elektrokolobezku>.
6. HORÁK, Patrik. Elektrická koloběžka. Brno, 2020. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. [online]. [cit. 2025-05-04]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=85930.
7. LINDEN, James. Build a DIY Electric Scooter. Nuts & Volts Magazine [online]. 2018 [cit. 2025-05-04]. Dostupné z: <https://www.nutsvolts.com/magazine/article/build-a-diy-electric-scooter>.
8. JOZOVÁ, Kateřina. Návrh elektrické koloběžky. Plzeň, 2021. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. [online]. [cit. 2025-05-04]. Dostupné z: <https://otik.zcu.cz/handle/11025/45329>.
9. ZÁKON č. 56/2001 Sb. o podmínkách provozu vozidel na pozemních komunikacích. Sbírka zákonů, 2001 [cit. 2025-05-04]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cz/56-2001-sb>.
10. ZÁKON č. 361/2000 Sb. o silničním provozu. Sbírka zákonů, 2000 [cit. 2025-05-04]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cz/361-2000-sb>.
11. SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (EU) č. 168/2013 o homologačních předpisech pro dvoukolová vozidla a čtyřkolové mopedy. Úřední věstník Evropské unie, 2013 [cit. 2025-05-04]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX%3A320>.
12. VYHLÁŠKA č. 341/2014 Sb. o technických podmínkách provozu vozidel. Sbírka zákonů,

2014 [cit. 2025-05-04]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cz/341-2014-sb>.

13. YANG, Electric vehicle traction motors without rare earth magnets. *Journal of Power Sources*, 2015, roč. 299, s. 1–10. ISSN 0378-7753. [online]. [cit. 2025-05-04]. Dostupné z: <https://>.

14. SOKIRA, Thomas J. a JAFFE, Wolfgang. *Brushless DC Motors: Electronics Commutation and Controls*. 1. vyd. Blue Ridge Summit: Tab Books, 1990. ISBN 9780830692675. [online]. [cit. 2025-05-04]. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=FkRYP7DWO9cC:contentRe>.

15. NOVÁK, Martin. Bezkartáčové motory. Vytápění, větrání, instalace, 2017, roč. 2017, č. 2, s. 62–65. ISSN 1210-5562. [online]. [cit. 2025-05-04]. Dostupné z: https://www.stpcr.cz/?download=articles/vvi-2017-02_s62.pdf.

16. ŠUŠLOV, Andrej. Řízení soustavy bezkartáčových motorů. Bakalářská práce. Vedoucí práce Ing. Matouš Pokorný. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra řídicí techniky, 2014. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/>.

17. PAJA-TRB. Skoro vše o akumulátorech a nabíjení. [online]. [cit. 2025-05-04]. Dostupné z: https://paja-trb.cz/konstrukce/nabijecka_autobaterek/o_aku_a_nabijeni.pdf,

18. REMA Battery. Typy baterií a akumulátorů a jejich použití. [online]. [cit. 2025-05-04]. Dostupné z: https://www.remabattery.cz/uploads/REMA_Battery/Pouziti_baterii_akumulatoru.pdf,

19. <https://riderguide.com/guides/electric-scooter-batteries/>, RIDER GUIDE. Electric Scooter Batteries: Everything You Need to Know. [online]. [cit. 2025-05-05]. Dostupné z: <https://riderguide.com/guides/electric-scooter-batteries/>.

20. SAMAD, Abdus, ALAHMARI, Aedh, ZAFAR, Sajid, SHARMA, Sandeep a ABDALLA, Ammar Hassan. A Comparative Analysis of Lithium-Ion Batteries Using a Proposed Electrothermal Model. *World Electric Vehicle Journal* [online]. [cit. 2025-05-05]. Dostupné z: <https://www>.

21. ANDERSON, Rich. Battery Management Systems for Electric Scooters. *EE Times* [online]. 2019. [cit. 2025-05-05]. Dostupné z: <https://www.eetimes.com/battery-management-systems-for-electric-scooters/>.

22. HANSELMAN, Duane C. *Brushless Motors: Magnetic Design, Performance, and Control of Brushless DC and Permanent Magnet Synchronous Motors*. 1. vyd. McGraw-Hill, 1994.

23. HALLIDAY, David, RESNICK, Robert a WALKER, Jearl. *Fyzika. Část 1: Mechanika*. Překlad. Praha: Prometheus, 2000.

24. CERAOLO, Massimo a Alessandro LIDOZZI. *Electric and Hybrid Vehicles: Technologies, Modeling and Control: A Mechatronic Approach*. 2nd ed. Chichester: Wiley, 2016. ISBN 978-1-119-02709-3.

25. CERAOLO, Massimo a Alessandro LIDOZZI. *Electric and Hybrid Vehicles: Technologies, Modeling and Control: A Mechatronic Approach*. 2nd ed. Chichester: Wiley, 2016. ISBN 978-1-119-02709-3.

26. BATTERY UNIVERSITY. *BU-808: How to Prolong Lithium-based Batteries* [online]. Last update: 2023 [cit. 2025-05-29]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-808-how-to-prolong-lithium-based-batteries>