

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

NÁVRH KONSTRUKCE ELEKTRICKÉ KOLOBĚŽKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. ŠTĚPÁN LASÁK

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2013/2014

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Štěpán Lasák

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Výrobní stroje, systémy a roboty (2301T041)**

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 diplomové práce:

### **Návrh konstrukce elektrické koloběžky**

v anglickém jazyce:

### **Suggestion of electric scooter**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhněte konstrukční řešení koloběžky poháněné elektromotorem

Cíle diplomové práce:

Navrhněte konstrukční řešení koloběžky poháněné elektromotorem, včetně elektrovýstroje, ekonomického zhodnocení a výkresové dokumentace

Seznam odborné literatury:

Kolíbal, Zdeněk

Průmyslové roboty I. Konstrukce průmyslových robotů a manipulátorů. PRaM Kolíbal, Zdeněk 1. vyd. Brno VUT Brno 1993 189 s. ISBN 80-214-0526-0

Kolíbal, Zdeněk

Průmyslové roboty II. Konstrukce výstupních hlavic a periferií Kolíbal, Zdeněk 1. vyd. Brno PC DIR 1993 165 s. ISBN 80-214-0533-3

Ehrenberger, Zdeněk

Průmyslové roboty III. Robotické systémy vyšších generací Ehrenberger, Zdeněk 1. vyd. Brno VUT Brno 1993 145 s.

Bělohoubek, Pavel

Průmyslové roboty IV. Projektování výrobních systémů s PRaM Bělohoubek, Pavel 1. vyd. Brno VUT Brno 1993 88 s. ISBN 80-214-0532-5

Pokorný, Karel

Stavba elektrických strojů I Pokorný, Karel Praha SNTL 1984 185 s.

internet a stránky jednotlivých výrobců

Vedoucí diplomové práce: Ing. Miloš Synek

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 26.11.2013

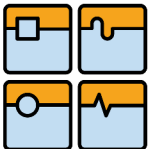
L.S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 4
DIPLOMOVÁ PRÁCE		

## ANOTACE

Cílem této diplomové práce je konstrukční návrh elektrické koloběžky s motorem zabudovaným v náboji zadního kola. Práce sestává z rešeršní části popisující současné typy klasických koloběžek a možnosti jejich motorizace a z části návrhové, která obsahuje jednotlivé konstrukční uzly a jejich potřebné výpočty.

## KLÍČOVÁ SLOVA

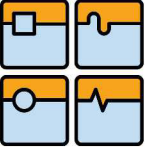
koloběžka, elektrická, elektromotor, konstrukce, návrh

## ANOTATION

The goal of this master's thesis is a construction design of an electric kick bike with the motor built in the axle of the rear wheel. The thesis consists of theoretical part, which is describing electric kick bikes used today and the possibility of motorization. The next part is a construction design with necessary calculations and formulas.

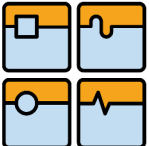
## KEYWORDS

kick bike, electric, electric motor, construction, design

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 5
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

### **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

LASÁK, Š. *Návrh konstrukce elektrické koloběžky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 86 s. Vedoucí diplomové práce: Ing. Miloš Synek

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 6
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

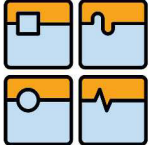
### ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma „Návrh konstrukce elektrické koloběžky“ vypracoval samostatně s využitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu použité literatury, který se nachází na konci této práce.

V Brně dne 30. května 2014

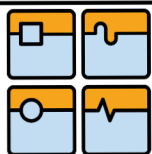
.....

Štěpán Lasák

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 7
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

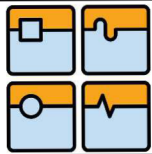
## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Miloši Synkovi za cenné rady a připomínky při zpracování diplomové práce. Dále bych rád poděkoval všem, kteří mě během studia podporovali, zejména své rodině a nejbližším přátelům.

**Obsah**


Koloběžka jako moderní dopravní prostředek.....	10
1 Koloběžky bezmotorové.....	11
1.1 Klasická konstrukce .....	11
1.2 Skládací konstrukce.....	12
1.3 Freestyle konstrukce.....	13
1.4 Kickboard.....	14
1.5 Atypické koloběžky .....	14
2 Koloběžky motorové .....	15
2.1 Legislativní zařazení koloběžky .....	15
2.2 Motorizace koloběžky z pohledu legislativy .....	16
2.3 Koloběžky poháněné spalovacím motorem .....	16
2.4 Koloběžky poháněné elektromotorem.....	17
2.5 Druhy pohonu elektrokoloběžek.....	17
2.6 Akumulátory.....	19
2.7 Řídící jednotka elektromotoru.....	21
2.8 Konstrukční provedení elektrokoloběžek .....	21
2.9 Porovnání elektrických a motorových koloběžek .....	23
3 Návrh konstrukce elektrické koloběžky - výkonová charakteristika.....	24
3.1 Jízdní odpory .....	25
3.2 Otáčková charakteristika elektromotoru.....	29
3.3 Případová studie jízdních vlastností.....	31
3.4 Parametry případové studie.....	32
3.5 Numerické řešení:.....	33
3.6 Grafické řešení.....	35
4 Návrh konstrukce rámu.....	37
4.1 Obecné požadavky .....	38
4.2 Pevnostní analýza.....	39
4.3 Analytické řešení - rozjezd.....	40
4.4 Analytické řešení – brzdění.....	50
4.5 Tvorba 3D modelu - designový a konstrukční návrh.....	55
4.6 Pevnostní simulace metodou konečných prvků .....	57
4.7 Hotový návrh rámu koloběžky.....	62





## DIPLOMOVÁ PRÁCE

5	Akumulátor .....	63
6	Nosič a řídicí jednotka.....	65
7	Programovatelná řídicí jednotka a plynový regulátor .....	68
8	Schéma zapojení elektrokomponent.....	68
9	Ostatní komponenty .....	69
10	Ekonomické zhodnocení .....	70
11	Kontrola rovnováhy .....	72
12	Hotový návrh elektrické koloběžky .....	73
12.1	Seznam parametrů .....	74
	Závěr.....	77
	Použité informační zdroje.....	78
	Seznam použitých zkratk a symbolů .....	81
	Seznam obrázků .....	83
	Seznam tabulek .....	85
	Seznam příloh.....	86

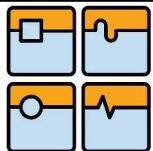
	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 10
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

### **Koloběžka jako moderní dopravní prostředek**

Koloběžky dnes neslouží pouze jako hračky pro děti, ale i jako plnohodnotný dopravní prostředek, který využívají dospělí lidé, ať už pro rekreační a sportovní účely nebo jako rychlé přibližovací prostředky v práci, do města, apod. Koloběžka neztratila nic na své kráse, naopak se v poslední době rozmáhá i díky možnosti motorizace. Původně byly motokoloběžky nabízeny majitelům jachet, obytných vozů a malých osobních letadel jako efektivní alternativa pro pozemní přepravu. V té době se jednalo zejména o koloběžky poháněné spalovacím motorem. Ovšem potenciál tichého, nezapáchajícího a skladného prostředku přivedlo až použití elektrických motorů. Vývoj těchto koloběžek probíhá neustále, tak jako probíhá vývoj nových baterií, účinnějších motorů a ostatních komponent.

Cílem této diplomové práce je vytvořit konstrukční návrh koloběžky poháněné elektromotorem. Práce sestává z části teoretické a praktické. Část teoretická se zabývá koloběžkami, které jsou v současnosti na trhu a jejich konstrukčním provedením. Dále se více zaměřuje na možnost motorizace, na koloběžky se spalovacím motorem a hlavně na koloběžky s elektrickým pohonem. V této části jsou dále více popsány různé typy elektromotorů a ostatní komponenty nutné pro stavbu elektropohonu. Závěrem teoretické části shrneme informace o konstrukci koloběžky, kterou budeme navrhovat.

Praktická část začíná výpočtovou částí elektropohonu. Cílem je zjistit jízdní vlastnosti koloběžky při různých velikostech jízdních odporů. Na základě těchto údajů je vybrán konkrétní elektromotor o daných parametrech. Další návrhová část se zabývá rámem koloběžky. Analytickou i numerickou metodou zjistíme předpokládanou pevnost rámu při různém zatěžování. Pomocí optimalizace se pak pokoušíme dosáhnout ideálních úprav rámu tak, aby vykazoval dostatečnou tuhost a nízkou hmotnost. V neposlední řadě proběhne návrh ostatního vybavení, jako nosiče a akumulátorového obalu a dalšího cyklo vybavení. V závěru práce se zabýváme celkovým zhodnocením návrhu. Ten obsahuje finanční analýzu, souhrn všech důležitých parametrů koloběžky a vyobrazení konečného produktu.



## 1 Koloběžky bezmotorové

Obecně se koloběžka považuje za jednostopý dopravní prostředek, který je poháněn odrážením jednou nohou od země, zatímco noha druhá stojí na plošině umístěné mezi dvěma koly nízko nad zemí. Tato plošina je součástí neodpruženého rámu, na který jsou uchycena poháněná kola. Koloběžka se ovládá říditky podobně jako u jízdních kol. Brzdění probíhá pomocí brzdy nášlapové - třecí, čelistové nebo kotoučové. Velikost, tvar, výbava a celkové provedení jednotlivých komponentů záleží na konkrétním typu koloběžky a jeho zamýšleného využití.

Na současném trhu existuje široké spektrum druhů koloběžek, kde v rámci použití lze rozdělit na dětské, městské, pro sport (sjezdové či freestylové koloběžky), turistiku nebo zábavu. V dnešní době se můžeme setkat i s univerzální konstrukcí koloběžek, která zahrnuje širší oblast použití, například je uzpůsobena jak pro pohyb v terénu, tak i ve městě. Kromě uvedeného dělení existuje další řada kritérií, podle kterých lze koloběžky kategorizovat jako například v případě této diplomové práce, kde je důležitá možnost instalace pomocného pohonu, který může být motorový, a to řešený spalovacím motorem nebo elektromotorem.

### 1.1 Klasická konstrukce



Obr. 1 - Koloběžka Yedoo [9]



Obr. 2 - Koloběžka Yedoo[9]

Nejběžněji používaný typ koloběžky, žádaný pro své všestranné využití. Vhodná do členitého terénu, pro dopravu ve městech, na silnicích nebo v přírodě. Slouží i pro sportovní účely - jako sjezdová (downhill) nebo závodní koloběžka.

Klasická konstrukce se vyznačuje pevným a tuhým rámem, který je většinou vyráběn z oceli nebo ze slitiny hliníku. Velikost ráfku nafukovacích kol se pohybuje v rozsahu 12" až 26" (30 až 66 cm), standardně jsou obě kola stejně velká. Výjimkou ovšem ani nejsou koloběžky, které mají přední kolo větší (orientační poměr 5:4), a to z důvodu zlepšení ovladatelnosti a jízdních vlastností, hlavně při vyšších rychlostech. Přední vidlice je tuhá, s teleskopicky nastavitelnými říditky. Hlavní výbavu pak tvoří čelistové nebo kotoučové brzdy, ergonomická madla, výstražné a bezpečnostní prvky, které chrání uživatele proti zranění. Přídavnou výbavou můžou být blatníky

předního a zadního kola, různé nosiče nebo závěsy na přepravu věcí, úchyty pro venčení psů nebo integrovaný stojánek. Oproti jiným koloběžkám jsou rozměrově největší a dosahují vyšší hmotnosti. Nejsou uzpůsobeny pro přenášení a transport na delší vzdálenosti. Ve velmi malé míře se ovšem vyskytují i koloběžky této konstrukce, které jsou skládací. Ta je potom ve složeném stavu vhodná jak pro transport (např. v kufru auta), tak i pro přenášení v ruce (v autobuse, v MHD, atd.), ale ztrácí na celkové tuhosti a i ve složeném stavu je poměrně velká.

## 1.2 Skládací konstrukce

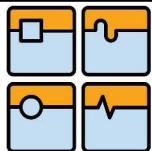


Obr. 3 - Koloběžka Rocket [10]



Obr. 4 - Koloběžka Rocket [10]

Skládací koloběžka je charakteristická svým kompaktním provedením, které umožňuje maximální mobilitu. Ta je dosažena hliníkovými komponenty a možností koloběžku kdykoliv složit pro snazší přesun. Vyznačuje se malými rozměry a nízkou hmotností (3 až 7 kg). Výška řídítek je osově nastavitelná. Kolečka jsou nízká a tvrdá, vyrobená většinou z PVC. Širší kolečka s hříbkovitým tvarem zajišťují lepší stabilitu při náklonech v zatáčce. Kvůli skládanému rámu vykazuje menší tuhost a není tedy vhodná na dynamickou jízdu (freestyle jízda, skoky, apod.). Pro delší vzdálenosti a nerovný povrch jsou tvrdá kolečka nežádoucí, protože se veškeré nárazy přenášejí do rukou uživatele. Z důvodu zachování jednoduché konstrukce je použita pouze zadní nášlapná brzda, ta je tvořena pohyblivým zadním blatníkem. Tak zkonstruovaná koloběžka je vhodná především pro jízdu na rovném povrchu, do města a na kratší vzdálenosti.



### 1.3 Freestyle konstrukce



Obr. 5 - Freestyle koloběžka [11]



Obr. 6 - Freestyle koloběžka [11]

Freestyle koloběžky se používají ke sportovním účelům - akrobatické jízdy ve skate-parku, na ulici nebo Flatland (rovné plochy) a předvádění triků podobných z BMX freestylu.

Pro tento účel musí koloběžka splňovat maximální tuhost s použitím odolných komponentů. Při jízdě a předvádění triků je vystavena velkému zatížení a nárazům. Rám je proto pevný, neskladný, vyrobený z oceli, nášlapná deska je pro zvýšení pevnosti a tlumení profilována. Řídítka nejsou osově nastavitelná, vyrobená jsou z hliníku nebo legovaných nerezových ocelí. Klasické závitové spojení řídítek s rámem koloběžky se z důvodu tvrdých nárazů časem rozvíklá a nenávratně poškodí. Toho se předchází použitím nezávitového spojení - kompresního systému. Brzda se používá výhradně jako přitlačná, třecí. Kolečka se vyrábí z odolné uretanové gumy s hliníkovým jádrem. Oproti ostatním typům koloběžek obsahují Freestyle konstrukce kvalitnější zapouzdřené ložiska, a to z důvodu zvýšené odolnosti při nárazech.



Obr. 7 - Jízda na U-rampě [12]



#### 1.4 Kickboard

Kickboard je relativně nový, atypický druh koloběžky, který představuje hybridní spojení koloběžky se skateboardem. Využívá se především pro sportovní jízdu kombinovanou s freestyle prvky. Dal tak vzniknout úplně novému odvětví sportu. Naopak pro relaxační jízdu není vhodný.

Skladba kol poskytuje lepší stabilitu. Používá se uspořádání 2+1, výjimečně se objevují i případy 2+2. Deska je dřevovláknitá a poskytuje lepší pružné vlastnosti. Přední mechanismus uchycení koleček disponuje systémem odpružení, který nakloněním řídicí tyče zatačí, zároveň však slouží pro zachycení sil vzniklých při průjezdu ostrých zatáček. Brzda se používá výhradně třecí.



Obr. 8 - Micro Monster kickboard [13]

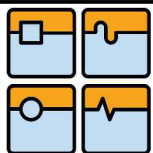
#### 1.5 Atypické koloběžky

Výše uvedené jsou základní typy klasických koloběžek, ale můžeme se setkat s celou další škálou upravovaných, atypických koloběžek. Tyto úpravy vychází hlavně z výše uvedených konstrukčních typů. Vždy ale záleží na zamýšleném použití dané koloběžky. Například u dětských koloběžek se můžeme z důvodu větší stability setkat s konstrukcí dvou zadních/předních kol. Je to tedy vlastně tříkolka, ale oproti kickboardu má klasické řízení otáčením. Dalším příkladem atypické úpravy jsou tzv. mushing koloběžky - používané pro venčení psů nebo pro tažení psím spřežením. Objevují se ale i naprosto nesouvisející hybridní spojení, jako např. SByke, který je kombinací skateboardu a BMX kola (viz obrázek).

Modifikacím se meze nekladou, musí být ale zachován základní princip koloběžky s řídítky - jedna noha funguje jako odrážedlo, zatímco druhá stojí na plošině.



Obr. 9- SByke P20 [14]



## 2 Koloběžky motorové

Předním důvodem motorizace koloběžek je šetření lidských sil při překonávání jízdních odporů a tím zvýšení celkového dojezdu. Motokoloběžky se používají pro rychlou pozemní přepravu a pro sportovní účely. Motor můžeme využívat jako pomocný doplněk v kombinaci s odražením nebo se můžeme nechat pouze vézt. Pro tuto situaci jsou některé koloběžky vybaveny demontovatelným sedadlem. Ovládání motoru je pomocí otočného regulátoru, většinou umístěného na pravé rukojeti. Ten má podobu klasické plynové rukojeti, kdy jejím otáčením plynule regulujeme výkon motoru. Motorizace koloběžky se provádí dvěma způsoby, a to přidáním spalovacího motoru nebo elektromotoru. Oproti klasickým koloběžkám jsou ty motorové většinou odpružené. Uložení kol může být pevné (bez odpružení) nebo s kyvnou vidlicí vzadu a odpružením (pomocí samostatných jednotek). Přední vidlice je teleskopicky nebo vahadlově odpružená. Motorizace se používá hlavně u koloběžek klasické konstrukce, ale principiálně se dá aplikovat na každý výše popsaný typ koloběžky. Vždy ale záleží na správném uvážení, aby daná koloběžka neztratila na původní myšlence použití, protože přidáním pohonu koloběžka výrazně nabývá na velikosti a hmotnosti a ztrácí tak na mobilitě. Proto se i u těchto koloběžek vyskytuje možnost složení pro snazší uskladnění nebo transport, např. v kufru auta nebo v MHD. I přes zvýšenou hmotnost jsou tyto koloběžky stále mobilnější než elektrokola, a jsou tedy vhodným přibližovadlem při rychlé a jednoduché přepravě ve městech, ale i v rozlehlých výrobních a obchodních komplexech, halách, apod.

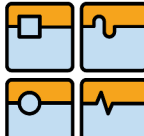
### 2.1 Legislativní zařazení koloběžky

Koloběžka je dopravní prostředek a její zařazení na pozemních komunikacích se v Česku stanoví dle § 57odst. 2 zákona č. 361/2000 Sb., o provozu na pozemních komunikacích (zákon o silničním provozu). V tomto předpisu je uvedeno, že: „Jízdním kolem se z hlediska provozu na pozemních komunikacích rozumí i koloběžka.“ Jezdec na koloběžce je tedy z hlediska provozu na komunikaci považován za cyklistu a musí dodržovat stejná pravidla jako cyklisté. Ty jsou uvedeny § 57 a § 58 stejného zákona. [16]

Povinnou výbavu pro koloběžku stanovuje předpis č. 341/2002 Sb., a to příloha č. 13 - Technické požadavky na jízdní kola, potahová vozidla a ruční vozíky. Mezi hlavní povinnou výbavu mimo jiné patří:

- dvě na sobě nezávislé účinné brzdy
- zadní odrazka červené barvy, přední odrazka bílé barvy, odrazky kol
- volné konce trubky řídítek musí být zaslepeny
- zakončení páček brzd a volné konce řídítek musí mít hrany obaleny materiálem pohlcujícím energii
- trvale vyznačeno dobře čitelné výrobní číslo

V případě, že je koloběžka použita pro jízdu za snížené viditelnosti, musí být vybavena zařízeními pro světelnou signalizaci a osvětlení dle části 2 předpisu č. 341/2002Sb., přílohy č. 13. V opačném případě nesmí být použita, protože není způsobilá k provozu na pozemních komunikacích.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 16
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

## 2.2 Motorizace koloběžky z pohledu legislativy

Jízdní kolo/koloběžka může být vybavena dodatečným pomocným motorkem, jestliže splňuje podmínky uvedené v příloze č. 13, předpisu č.341/2002Sb [-] a zároveň splňuje EU směrnici „O schvalování typu dvoukolových a tříkolových motorových vozidel“ (2002/24/EC) [16]

- a) bude nadále zachován původní charakter jízdního kola (podle čl. 1,2)
- b) pomocný motorek bude přiměřeně plnit podmínky ustanovení § 19
- c) jeho výkon nepřesáhne 250W
- d) v případě použití spalovacího motoru, nebude mít takový motor objem válce/ů větší než 50 cm<sup>3</sup>
- e) maximální konstrukční rychlost nebude vyšší než 25 km/h
- f) montáž pohonného systému (motor, nádrž paliva nebo akumulátor) na jízdní kolo si nevyžádá zásah do jeho nosných částí

Pokud bude koloběžka splňovat výše uvedené požadavky, považuje se pro potřeby dané vyhlášky za jízdní kolo a je způsobilá k provozu na pozemních komunikacích.

## 2.3 Koloběžky poháněné spalovacím motorem

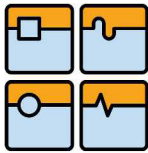
Pro tuto metodu pohonu se nejčastěji používá 2tákní nebo 4tákní vzduchem chlazený motor, o objemu maximálně 50 ccm a maximální konstrukční rychlosti 25 km/h. V reálném provozu ovšem rychlost dosahuje až k 65 km/h[17]. Vyskytují se i pohony se silnějším motorem, v těchto případech se jedná většinou o atypické koloběžky amatérské konstrukce, ale třeba i prodávané „sportovní speciály“. Motor disponuje odstředivou spojkou a volnoběžkou. Startování je ruční pomocí startovacího lanka.



Obr. 10 – Koloběžka Blatino poháněná spalovacím motorem

Plyn se kromě výše uvedeného může přidávat i malou páčkou (tvarem podobná brzdové páčce a je umístěna nad ní). Přenos krouticího momentu je válečkovým řetězem na zadní rozetě nebo třením přes váleček na plášť kola. Metoda pohonu třecím válečkem je obzvláště jednoduchá, levná, ale nejméně efektivní. Používá se zřídka u amatérských konstrukcí a v současnosti je na ústupu. Převodovka je jedno/dvouступňová, řazení u dvouступňové převodovky je mechanické





přehazovačkou na řídítkách. To umožňuje snazší rozjezdy, jak po rovině tak hlavně do kopců, změnou převodového stupně při nižších otáčkách. Navíc se to projeví nižší spotřebou paliva a nižší hlučností motoru. [17]



**Obr. 11 - Převodovka jednostupňová, uzavřená s ozubenými koly | převodovka jednostupňová řemenová | převodovka dvoustupňová řemenová [19]**

Celosvětově nejznámějšími výrobci koloběžek vybavenými spalovacím motorem jsou americké koloběžky Go-Ped a Nitro Scooters a české koloběžky Blatino (firma Blata)[18]. Americké koloběžky jsou poněkud od těch českých odlišné. Disponují několika odlišnými podvozky a různými motory, původem z malé zahradní mechanizace. [18]

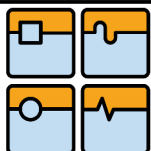
## 2.4 Koloběžky poháněné elektromotorem

Pro pohon elektrokoloběžek se v současnosti používají bezkartáčové stejnosměrné elektromotory o výkonu až 1500W. V praxi se můžeme setkat nejčastěji s následujícími variantami náhonu.

## 2.5 Druhy pohonu elektrokoloběžek

### a) elektromotor s planetovou převodovkou a přímým náhonem

Tento motor je určený pro vpletení do předního či zadního kola. Dosahuje výkonu až 1000W v rozsahu od 24 do 48V. Převodovka je součástí elektromotoru a pomáhá při rozjezdech a jízdě do kopce tak, že udržuje efektivní otáčky motoru a dostatečný krouticí moment i při pomalém otáčení kola (převodový poměr většinou 5:1). Satelity převodovky jsou vyrobeny z umělé hmoty a podléhají většímu opotřebení. Díky zabudované převodovce je celý náboj poměrně široký a není vhodný pro zabudování do úzkých kol. Hodí se pro kola o velikosti od minimálních 16" do ideálních 26". Na motor je možná instalace kotoučové brzdy. Při jízdě bez motoru neklade žádný mechanický odpor z důvodu zabudované spojky, která se stará o rozepínání náhonu. Z tohoto důvodu nelze použít tento typ pro zpětnou rekuperaci energie. Nejčastěji se tento motor používá o výkonu 250W. Je oblíbený pro svou nízkou hmotnost (2,4 - 3,5 kg) a malou velikost. Na trhu jsou k dostání levné čínské typy od výrobců Bafang, BMC a Cute a kvalitnější, ale dražší od severoamerických výrobců BionX, Crystalite a MAC.[22]



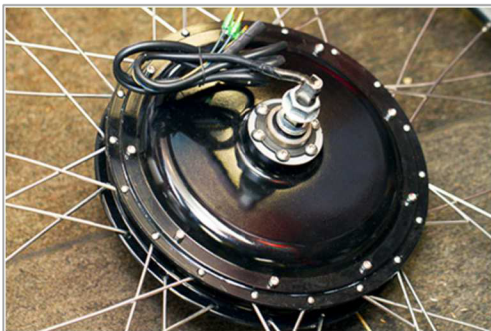
Obr. 12 - Elektromotor s planetovou převodovkou [21]

**b) elektromotor a nepřímý náhon**

Elektromotor je umístěn mimo kolo tak, aby nezasahoval do konstrukce koloběžky. Přenos krouticího momentu od pastorku motoru na rozetu zadního kola je přes válečkový řetěz nebo ozubený řemen, převodový stupeň určuje velikost pastorku a rozety na poháněném kole. Toto provedení se používá hlavně u skládacích koloběžek menší velikosti.

**c) elektromotor bez převodovky a přímým náhonem**

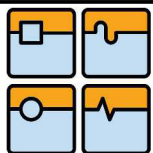
Jedná se o nejmodernější a nejvýkonnější motory pro vpletení do předního i zadního kola. Provozní napětí je v rozsahu 36-48V. Jsou vybaveny kvalitními permanentními magnety, dosahují vysoké účinnosti až 87%. Vyrábějí se i s velkým průměrem pro vysoký točivý moment i při nižších otáčkách, při pohybu bez motoru umožňují zpětnou rekuperaci energie. Jsou konstrukčně jednoduché a spolehlivé. Oproti předchozím typům jsou větší a těžší, díky ale absenci převodovky a spojky nejsou tak náchylné na poškození. Rekuperace energie a s tím spojené regenerativní brzdění zase usnadní používání koloběžky při dlouhých sjezdech, jelikož je koloběžka motorem neustále brzděna a člověk tak nemusí neustále mačkat brzdovou páčku. Při odrazech bez motoru je ale zase, na druhou stranu, lehce cítit zpětný tah motoru.



Obr. 13 - Elektromotor 9C [23]



Obr. 14 - Stator elektromotoru 9C [23]



## 2.6 Akumulátory

Akumulátory určené k napájení elektromotoru jsou sestaveny z většího počtu elektrochemických článků, ty vytváří akumulátorový paket. Chemický bateriový článek je obecně tvořen kladnou a zápornou elektrodou. Jednotlivé bateriové články jsou mezi sebou propojeny v kombinaci sério-paralelního zapojení. Při sériovém zapojení článků roste výsledné napětí při konstantní kapacitě a při paralelním zapojení naopak roste kapacita při konstantním napětí. Způsob zapojení článků v baterii lze zjistit i dle jejího popisu, např. 10S4P - 10 článků sériově a 4 paralelně). Podle materiálu elektrod rozlišujeme akumulátory [2]:

### a) olověné (Pb)

V současnosti jsou na ústupu a na trhu se drží kvůli své nízké ceně. Vyskytují se pořád u starších montáží elektrokol nebo elektrokoloběžek. Vyznačují se velkou hmotností a rozměry, dlouho se nabíjí. Elektrolyt tvoří kyselina sírová. Ta společně s olovem zatěžuje v případě neprovedené recyklace životní prostředí. Dnes se používají se zahuštěným gelovým elektrolytem. Akumulátor je pak bezúdržbový, při nabíjení neunikají škodlivé plyny a snižuje se riziko úniku elektrolytu.

### b) niklkadmiové (NiCd)

Nahradili olověné akumulátory, předčili je v celkovém rozměru, hmotnosti a menší zátěži životního prostředí (i přes jedovatost kadmia). Nevadí jim skladování ve vybitém stavu, proto jsou odolné proti hlubokému vybití a poškození baterie. Z důvodu vyšší ceny, jedovatosti kadmia a hmotnosti jsou tyto baterie v dnešní době již neperspektivní (viz srovnávací tabulka).

### c) niklmetalhydridové (NiMh)

Oproti NiCd akumulátorům mají více než dvakrát vyšší kapacitu při jinak stejných parametrech (rozměry, hmotnost). Skladovat tyto baterie můžeme ve vybitém i nabitém stavu, musí se ale nejméně 3x v průběhu jednoho roku několikrát nabít a vybit, jinak může dojít k poškození elektrod článků a nenávratné ztrátě kapacity. Její životnost je omezena počtem nabíjecích cyklů (cca 500), potom významně ztrácí kapacitu a musí být repasována. Používání těchto baterií je v současnosti na ústupu.

### d) lithium iontové (Li-Ion)

Mají zvýšenou kapacitu a jsou velmi lehké, proto je jejich cena ve srovnání s NiMh bateriemi vyšší. Nicméně díky delší životnosti jsou výhodnější. Jsou konstruovány až na tisíc nabíjecích cyklů.

### e) lithium polymerové (Li-Pol)

V současnosti používaných baterií se vyznačují nejlepším poměrem hmotnosti ke kapacitě a životnosti. Baterie mají nízké samo-vybíjecí charakteristiky a jsou velmi citlivé na přesné nabíjení. Největším benefitem Li-Pol akumulátorů je jednoznačně nejvyšší hustota uchované energie, tedy nejmenší rozměry a hmotnost akumulátoru při stejném množství uchované elektřiny (ve srovnání s ostatními typy). Hlavní nevýhoda akumulátoru je vyšší pořizovací cena.

### f) lithium-železo fosfátové (LiFePO<sub>4</sub>) a další

Ve srovnání s baterií Li-Pol mají menší hustotu uchované energie, jsou tedy větší a těžší, ale zase levnější. Dokážou rychle absorbovat a vydávat energii, jsou schopné dodat vyšší proud. Počet cyklů je srovnatelný s Li-Pol. Mají výbornou tepelnou kapacitu a nezatěžují životní prostředí - jsou netoxické [7].

Určujícím parametrem každé baterie je její kapacita, tedy celkový náboj, který může baterie při vybití vydat, než její napětí poklesne na nejnižší přípustnou hodnotu. Jednotka kapacity baterie je ampérhodina (Ah). V následující tabulce uvádím přehled výkonových parametrů jednotlivých baterií o stejné kapacitě.

**Tab. 1 - Srovnání akumulátorů rozdílných typů**

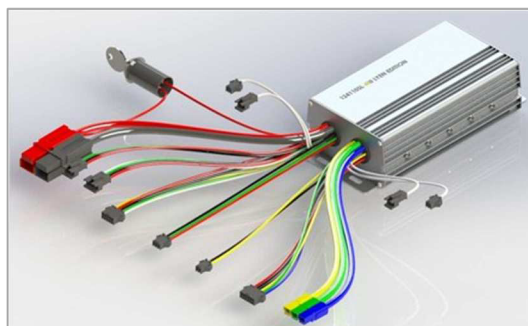
Akumulátorový typ	ENERGIE [Wh]	NAPĚTÍ NA ČLÁNEK [V]	VYBÍJECÍ PROUD [A]	VELIKOST [cm <sup>3</sup> ]	HMOTNOST [kg]	CENA [USD]	USD / Wh	Wh / kg
olověný (Pb)	360	2	15	3270	10	100	0,28	36
niklkadmiový (NiCd)	360	1,2	5	2430	7,8	480	1,33	46
niklmetalhydridové (NiMH)	360	1,2	10	2230	5,4	300	0,83	67
lithium iontové (Li-Ion)	360	3,7	20	1613	2,2	432	1,20	164
lithium polymerové (LiPol)	360	3,7	20	1346	2,2	418	1,16	164
lithium železo-fosfátové (LiFePO <sub>4</sub> )	360	3,2	25	2524	3,3	385	1,07	109

Pozn.: Srovnávali se aktuálně prodávané akumulátory 36V/10Ah, dostupné na <http://www.batteryspace.com/>

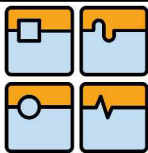
Nejběžněji dnes používané akumulátory u elektrických koloběžek a kol jsou LiFePO<sub>4</sub> a Li-Ion akumulátory. Jejich umístění je u naprosté většiny koloběžek v místě stupátka mezi předním a zadním kolem. Toto řešení přináší snížení těžiště a lepší ovladatelnost koloběžky, navíc je i designově chytré, akumulátor nikde nepřekáží a je schován a chráněn v rámové konstrukci. Ovšem z praktického hlediska je situace jiná. Díky tloušťce a krytu baterie se zvětší výška nášlapné plochy nad terénem. To znesnadňuje jízdu při odražení bez motoru, jelikož vždy při každém odrazu musíme více pokrčit stojnou nohu na stupátku.



Obr. 15 - Akumulátor LiFePO<sub>4</sub> 36V/10Ah[23]

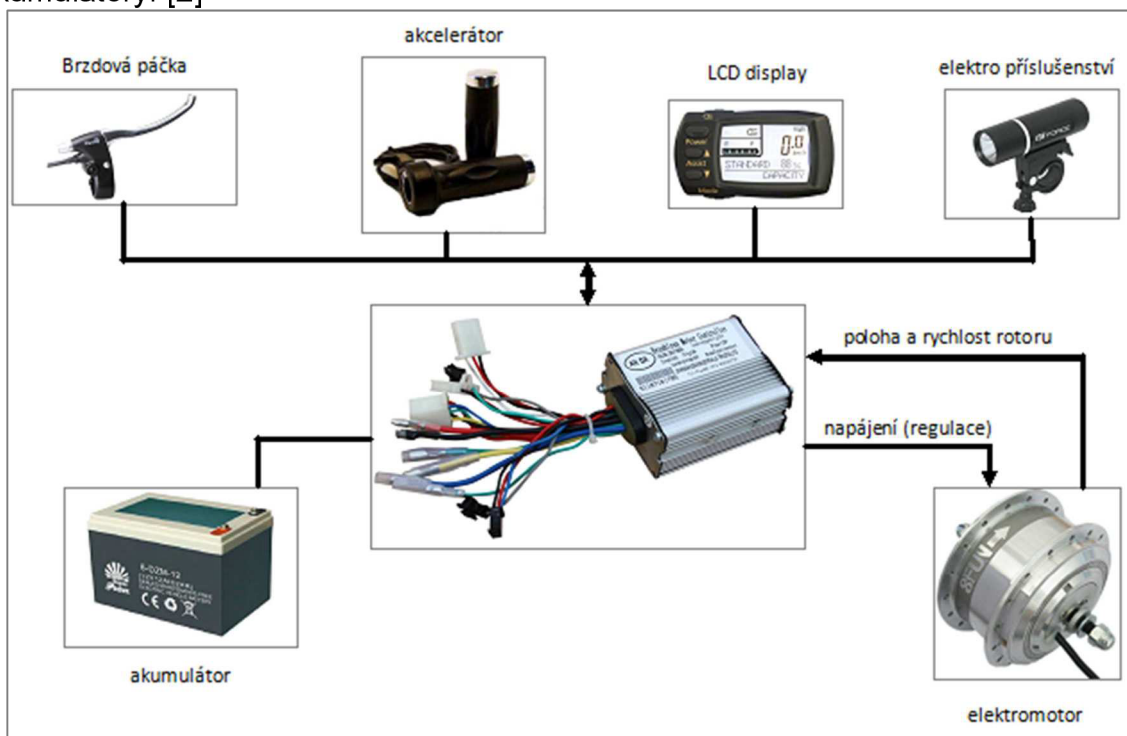


Obr. 16 - Řídicí jednotka [24]



## 2.7 Řídicí jednotka elektromotoru

Řídicí jednotka představuje takový mozek elektrokoloběžky. Obsahuje řídicí elektroniku a výkonný inteligentní mikroprocesor. Vhodným způsobem reguluje potřebný výkon elektromotoru (kontrolovaný plynulý rozjezd), jeho odpojení při brzdění, chrání akumulátor před poškozením (omezení výkonu, vypnutí a upozornění na podpětí nebo přepětí), apod. Na trhu jsou k dostání i řídicí jednotky programovatelné, které jsou vhodné pro univerzální použití při regulaci různých elektrovozidel (golfové vozíky, motocykly, vozíky), ale jsou vhodné i pro „tuningové“ ladění a testování elektrokol a koloběžek, které jsou vybaveny rozdílnými motory a akumulátory. [2]





Obr. 17 - Funkce řídicí jednotky v obvodu

## 2.8 Konstrukční provedení elektrokoloběžek

Na trhu se aktuálně nacházejí dvě varianty elektrických koloběžek. Ty se od sebe liší v konstrukci, ve volbě pohonu a taky v použití. V zásadě si můžeme vybrat mobilní skladnou koloběžku nebo větší a těžší neskladnou variantu uzpůsobenou na delší jízdy.

### a) mobilní skládací koloběžka s nepřímým pohonem

Akumulátor baterie je výhradně schován v rámu koloběžky, pod středovým stupátkem. Kola jsou malá a neumožňují z důvodu své velikosti zabudovat motor do náboje kola. Pohon je proto volen jako nepřímý, motor je umístěn v zadní části a se zadním kolem je spojen válečkovým řetězem. Motor je bez převodovky, ale o plynulejší rozjezd se stará větší rozeta s volnoběžkou na zadním kole. Zavěšení kol je odpružené nebo pevné. Řídítka jsou teleskopicky nastavitelná a pro vyšší komfort je možné připojit odnímatelné sedlo. Celkové rozměry koloběžky jsou malé a hmotnost dosahuje kolem 15 kg. V případě potřeby jde koloběžka bez dalších

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 22
	<b>DIPLOMOVÁ PRÁCE</b>	

nástrojů složit a převést třeba v kufru auta. Svou konstrukcí je spíš uzpůsobena pro rychlý přesun ve městech na zpevněném povrchu a na kratší vzdálenosti. Naopak není vhodná pro delší aktivní jízdy na silnicích nebo polních cestách, kdy se chceme odrážet a motor používat minimálně. Jednak kvůli špatné ovladatelnosti z důvodu použití menších kol a taky kvůli nepohodlnému odrážení z důvodu větší výšky nášlapné plochy. Navíc u modelů vybavených přední brzdou je z důvodu malého rozvoru a výšky těžiště jezdce nutné brát zřetel na riziko překlopení koloběžky při zablokování předního kola.



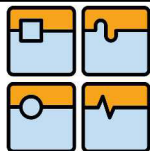
Obr. 18 - Skladná koloběžka Razor [25]

#### **b) neskladná koloběžka s přímým pohonem**

Rám koloběžky tvoří svařenec z ohýbaných trubek nebo profilů. Akumulátor je umístěn, jako v přechodném případě, ve středu rámu pod stupátkem nebo v přední a zadní části rámu. V přední části je uchycen na místě držáku nápojů a v zadní části je umístěn nad kolem. Koloběžka má větší vyplétaná kola s užším profilem. Zadní kolo je většinou zavěšeno pevně ve vidlici, bez odpružení. Přední kolo je o stejné velikosti nebo větší než zadní a je uchyceno do odpružené či neodpružené vidlice s říditky, stejnými jako na silničních kolech. Říditka nejsou osově nastavitelná. Elektromotor je umístěn ve středu předního nebo zadního kola. Umístěním motoru do kola s větším průměrem dosáhneme vyšší rychlosti, ale menšího zrychlení. U kola s menším průměrem je to naopak. Motor je buď s přímým náhonem, nebo s vestavěnou planetovou převodovkou a spojkou. Koloběžka je rozměrově větší a těžší než skládací typ. Je ale lépe uzpůsobena pro aktivní použití v různorodém terénu, kdy se jezdec nechce jenom vézt elektromotorem, ale i odrážet.



Obr. 19 - Neskladná varianta Apache Infantil [26]



## 2.9 Porovnání elektrických a motorových koloběžek

### Benzínová koloběžka



Obr. 20 - ilustrativní obrázek

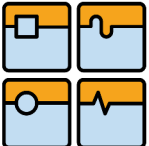
### Elektrická koloběžka



Obr. 21 - ilustrativní obrázek

- + výhodnější na delší trasy
- + lepší ovladatelnost z důvodu nižší pozice stupátka
- + rychlost
- + malá spotřeba a velký dojezd
- + svižnější jízda do kopce
  
- nutnost pravidelné údržby (motor a pohonné ústrojí)
- vysoký hluk
- poruchovost (více částí náchylných na poruchu)
- benzínový zápach
- studený motor více kouří a vibruje, poskytuje menší výkon
- přimíchávání oleje k benzínu

- + bezúdržbová
- + vyšší krouticí moment při rozjezdech po rovině
- + velmi tichý provoz
- + vysoká spolehlivost
- + menší rozměry
  
- dobíjení baterie (1,5 - 4 hod)
- malý dojezd
- těžší než benzínové (koloběžky výkonově stejné)
- pořizovací cena
- vysoké těžiště (ovladatelnost)

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 24
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

### 3 Návrh konstrukce elektrické koloběžky - výkonová charakteristika

V následující praktické části se zaměříme na návrh elektrické koloběžky, typem se bude jednat o neskladnou koloběžku, určenou pro aktivní jízdu odrážením a občasným pomocným pohonem do kopce. Hlavní použití bude na silnicích, ale i na nezpevněných komunikacích. Z těchto důvodů bude hlavním cílem, aby koloběžka byla co možná nejlehčí a současně dostatečně tuhá. Důležitým bodem konstrukce bude taky celková geometrie rámu, tak aby bylo odrážení nejméně namáhavé a uživatel se tak během jízdy moc nenadřel.

#### Výkonová charakteristika koloběžky

Tato kapitola se věnuje jízdním vlastnostem pohonu elektrické koloběžky, zejména dynamice - zrychlení a nejvyšší rychlost při jízdě po rovině a do kopce, při různé velikosti stoupání a rychlosti větru. V analytické podobě se budeme snažit nasimulovat matematický model, který předpovídá výkon elektromotoru nutný k překonání odporů během jízdy. Z otáčkové charakteristiky vybraného elektromotoru pak zjistíme konkrétní jízdní vlastnosti naší koloběžky při jízdě různým prostředím.

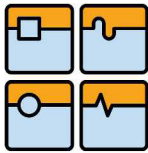
Požadavky pro pohon jsou následující:

- minimální rychlost 25 km/h
- minimální dojezd 20 km
- zatížení koloběžky 100 kg
- minimální zrychlení  $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$

Postup při návrhu elektromotoru:

- obecné vyjádření odporů působících proti směru jízdy
- zjištění otáčkové charakteristiky motoru
- výpočet silového působení na jezdce při různých rychlostech
- výpočet akcelerujících sil a jízdních vlastností
- numerické vyjádření výsledků
- grafické vyjádření výsledků





### 3.1 Jízdní odpory

Celková energie nutná pro pohon koloběžky s jezdcem je primárně spotřebována na překonání vzdušných odporů a odporů při stoupání do kopce při normálních rychlostech. Sekundárně se spotřebovává při ložiskovém tření a valivém tření kol. Tyto sekundární síly jsou velmi malé při vysokých rychlostech, ovšem můžou se vyrovnat velikosti odporu vzduchu při rychlostech velmi malých.

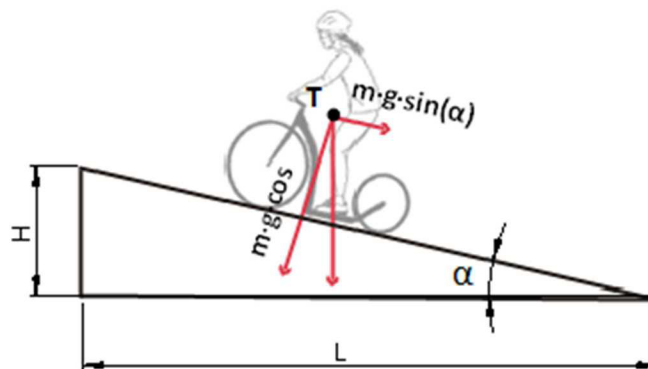
#### Odpor stoupání [1]

Odpor stoupání je určen složkou tíhy vozidla rovnoběžnou s povrchem vozovky:

$$F_{ST} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \cdot v_k \quad [W] \quad 3.1$$

kde:

$m$ [kg]	hmotnost koloběžky + jezdce ( $m = 120$ kg)
$g$ [ $m/s^2$ ]	tíhové zrychlení ( $g = 9,81$ $m/s^2$ )
$\alpha$ [ $^\circ$ ]	úhel stoupání
$v_k$ [m/s]	rychlost koloběžky



Obr. 22 - Rozklad tíhové síly při stoupání

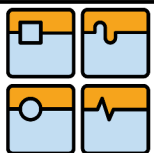
Při praktických výpočtech se obvykle úhel stoupání nahrazuje sklonem svahu ( $s$ ), pro který platí:

$$\text{stoupání} = \frac{H}{L} \cdot 100 \quad [\%] \quad 3.2$$

kde:

$H$ [m]	vertikální převýšení
$L$ [m]	ujetá vzdálenost

Průměrné stoupání v ČR se pohybuje v rozmezí 5-6 %, maximální stoupání silnice je 10 až 12 %, vyšší stoupání mají zpravidla jen vysokohorské silnice a ty v našem modelu uvažovat nebudeme [4].

**Odpor vzdušný [4]**

Odpor vzduchu je nejdůležitější proměnou při spotřebě energie a má tak velký význam na celkový dojezd koloběžky. Pro velikost síly, kterou na nás působí vítr, platí základní vztah:

$$F_{vz} = \frac{C_d \cdot \rho_{vz} \cdot S_c \cdot v_r^2}{2} [\text{N}] \quad 3.3$$

kde:

$C_d [-]$  koeficient aerodynamického odporu  
 $\rho [\text{kg/m}^3]$  hustota vzduchu ( $\rho = 1,15 \text{ Kg/m}^3$  v nadmořské výšce 300m)  
 $S_c [\text{m}^2]$  velikost čelní plochy  
 $v_r [\text{m/s}]$  relativní rychlost, její velikost je rovna:

$$v_r = v_v + v_k [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad 3.4$$

kde:

$v_v [\text{m/s}]$  rychlost větru ( $< 45 \text{ km/h} = 12,5 \text{ m/s}$ )

Potřebný výkon k překonání vzdušného odporu závisí na rychlosti koloběžky ( $v_k [\text{m/s}]$ ) a je dán vztahem:

$$P_{vz} = F_{vz} \cdot v_k [\text{W}] \quad 3.5$$

**Koeficient aerodynamického odporu  $C_d$** 

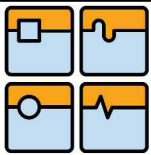
Koeficient aerodynamického odporu závisí na tvaru, který vzduch musí obtékat (aktuální poloha jezdce, členitosti a hladkosti jeho povrchu, atd.). Menší hodnota součinitele znamená snadnější a plynulejší obtékání vzduchu. Dle [x] je velikost koeficientu pro cyklistu 1. Tuto hodnotu můžeme použít i pro jezdce ve stoji. Pro jezdce v pokleku klesá tato hodnota na 0,9 [1].

**Velikost čelní plochy  $S_c$** 

Velikost čelní plochy při pohybu na koloběžce se bude blížit hodnotám pro jízdu na jízdním kole. Podle [x] je čelní plocha cyklisty (muž, 80kg, běžný oděv) včetně kola  $0,504 \text{ m}^2$ , kde torzo těla činí  $0,127 \text{ m}^2$ . Pro jezdce v předklonu proto použijeme velikost  $0,404 \text{ m}^2$  (sníženou o část plochy torza těla) [1].



Obr. 23 - Jízda v předklonu [37]



Odpor prostředí se výrazně zvyšuje s relativní rychlostí jízdy (s její druhou mocninou), kde se započítává rychlost větru a koloběžky. Snížení působení odporu vzduchu nejefektivněji ovlivníme zmenšením velikosti čelní plochy a tím i koeficientu aerodynamického odporu. Toho na koloběžce dosáhneme jízdou v předklonu. Delší jízda v takové poloze je ovšem při běžné jízdě nepohodlná, ale později si ukážeme, že nezanedbatelně ovlivní dynamiku rozjezdu při velkých rychlostech větru.

### Odpor ložiskového tření [1]

Odpor v ložiskách kol, v důsledku zatížení hmotnosti cyklisty a koloběžky, mají na celkový jízdní odpor jen velmi malý vliv. Dle výrobců ložisek je velikost odporového momentu ložiska dána:

$$M_L = \frac{1}{2} G \cdot i \cdot d_1 [\text{Nm}] \quad 3.6$$

kde:

G [N]	zatížení ložiska (tíhová síla jezdce)
i [-]	součinitel odporu valení ložiska (0,002 - 0,02)
$d_1$ [m]	průměr ložiska
d [m]	průměr kola

potom síla působící na obvodu kola bude:

$$F_L = \frac{2M_L}{d} [\text{N}] \quad 3.7$$

Odpor ložiskového tření odebírají pouze cca 1% z celkového výkonu, a tudíž je můžeme při další úvaze zanedbat.[1]

### Odpor valivého tření [4]

Odpor valivý vzniká deformací pneumatiky a vozovky. Je-li vozovka tuhá, pak dochází jen k deformaci pneumatiky. Odpor valivý je významnější při pomalých rychlostech, a tedy při rozjezdu převládá nad odporem vzdušným. Ten začne převládat až při rychlostech větších než cca 15 km/h (pokud uvažujeme rychlost větru menší než 1 km/h). Vzhledem k dosahovaným průměrným rychlostem na koloběžce je vliv valivého tření přibližně o třetinu větší než na jízdním kole.

Valivý odpor je dán vztahem:

$$F_f = m \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot f [\text{N}] \quad 3.8$$

kde:

f [-] rameno valivého odporu, které závisí především na povrchu vozovky, deformaci pneumatiky a rychlosti kola (při rychlostech vyšších než 40 km/h, můžeme ji tedy zanedbat) Deformace pneumatiky je závislá na huštění. Při menším tlaku vzduchu v pneumatice dochází k větší deformaci pneumatiky a tím i zvětšení délky ramene valivého odporu. Ten vyvolává moment odporu valení a působí proti otáčení kola. Pro rovnou a hladkou nepoddajnou vozovku a dobře nahuštěnou pneumatiku lze počítat s hodnotou ramene valivého odporu 0,01 až 0,005 [1]

Část výkonu nutného pro překonání valivého odporu potom bude:

$$W_f = F_f \cdot v_k [\text{W}] \quad 3.9$$

kde:

$v_k$ [m/s] rychlost koloběžky

### **Celkový jízdní odpor[1]**

Celková síla působící proti pohybu koloběžky je:

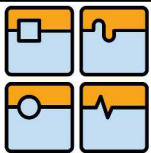
$$F_C = F_{ST} + F_{vz} + F_L + F_f \text{ [N]} \quad 3.10$$

potřebný výkon motoru pro překonání sil potom bude:

$$P_C = F_C \cdot v_k \text{ [W]} \quad 3.11$$

Z výše uvedených vzorců se bude vycházet při uvažování následujících případových studií:

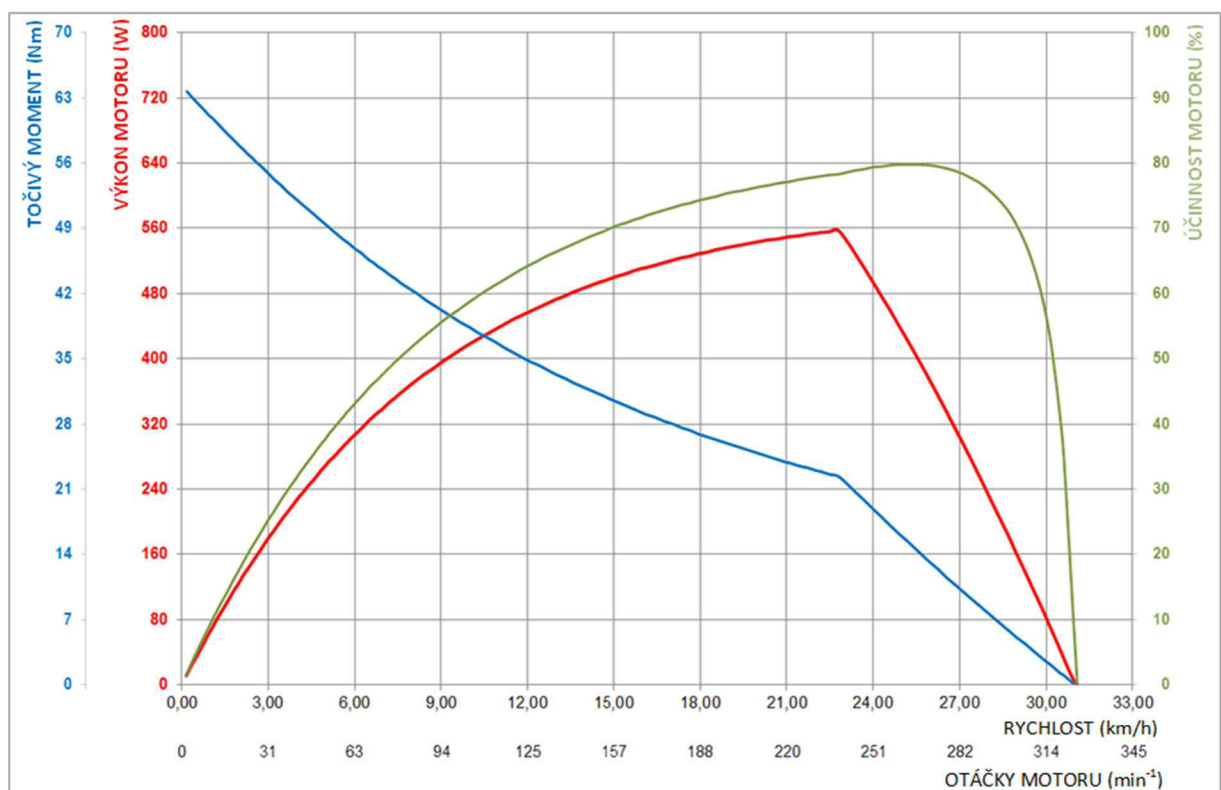
- a) jízda na rovině při bezvětří
- b) jízda na rovině při slabém větru
- c) jízda na rovině při silném větru
- d) jízda do kopce
- e) jízda do kopce při slabém větru



### 3.2 Otáčková charakteristika elektromotoru

Pro pohon koloběžky je předběžně zvolen elektromotor Bafang BPM 36V500W, který se montuje do zadního kola koloběžky. Jedná se o variantu nízkotáčkovou, kde maximální výkon se pohybuje kolem 240 ot/min (výstupní otáčky). Toto je dosaženo použitím planetového převodu v redukčním poměru 5:1. Motor disponuje dostatečným točivým momentem, ovšem při použití na 20" zadní kolo (0,5m) dosahuje nižší rychlosti. Řešením by byla volba většího průměru ráfku zadního kola, ale to není pro uvažovanou konstrukci koloběžky vhodné. Schůdnější je volba instalace motoru do předního kola. Ovšem větší průměr kola by měl za následek zvýšení maximální rychlosti koloběžky pouze o cca 5 km/h, ale současně dojde dle vzorce 3.13, z důvodu většího poloměru kola, ke snížení velikosti akcelerující síly. Navíc z praktického hlediska je vhodnější instalace motoru do zadního kola, protože odpadá složitější umístění komponentů (baterie, řídicí jednotka) a vedení kabeláže v případě, že jsou tyto komponenty umístěny v prostoru nad zadním kolem.

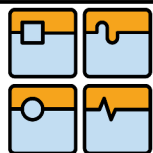
Otáčková charakteristika motoru byla pořízena praktickým měřením na ebikes.ca [27]:



Obr. 24 - Otáčková charakteristika motoru BPM 36V, 500W

Tab. 2 - Mezní parametry měřeného motoru

	proud $I$ [A]	příkon $P_i$ [W]	točivý moment $M_n$ [Nm]	otáčky $n$ [min <sup>-1</sup> ]	výkon $P_o$ [W]	účinnost $\eta$ [%]
bez zátěže	1,8	70,0	0,2	322,9	8,0	11,3
max. účinnost	14,4	506,0	14,5	266,2	404,0	79,8



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

max. moment	57,3	712,0	63,2	3,0	21,0	2,9
max. výkon	21,4	712,0	22,4	237,8	558,0	78,3

Pozn.:

- motor připojen na baterii LiFePO4 o nominální hodnotě napětí 36V/10Ah (baterie je složena z 12 článků, 3,3V na článek - hodnota napětí naprázdno 39,6V)
- řídicí jednotka s limitním proudem 20A, otočný regulátor byl nastaven na plný výkon

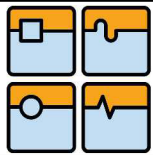
Z grafické podoby otáčkové charakteristiky jsme odečetli výkon, točivý moment a účinnost motoru z 0 do 330 otáček po přírůstku cca 3-5 otáčky. Součástí otáčkové charakteristiky je i záznam výkonových hodnot připojené baterie v závislosti na aktuálních otáčkách motoru. Díky tomu můžeme určit teoretickou velikost dojezdu koloběžky při různých velikostech jízdních odporů. Pro stručný přehled uvádím část tabulky zaznamenaných dat, který jsme získali odečtem z grafu.

Tab. 3 - Část tabulky zaznamenaných dat z měření motoru

číslo odečtu [-]	motorové charakteristiky				bateriové charakteristiky		
	otáčky [min-1]	točivý moment [Nm]	výkon [W]	účinnost [%]	výkon [W]	proud [A]	napětí [V]
10,0	18,9	58,4	116,0	16,2	712,0	20,0	35,6
11,0	20,5	57,9	124,0	17,4	712,0	20,0	35,6
12,0	22,0	57,5	133,0	18,6	712,0	20,0	35,6
⋮							
59,0	122,8	35,2	453,0	63,7	712,0	20,0	35,6
60,0	126,0	34,7	458,0	64,4	712,0	20,0	35,6
61,0	129,2	34,3	463,0	65,1	712,0	20,0	35,6
⋮							
110,0	280,4	10,7	314,0	78,8	399,0	10,7	37,5
111,0	283,5	9,9	294,0	78,3	375,0	10,0	37,6
112,0	286,6	9,1	273,0	77,6	351,0	9,3	37,7



Obr. 25 - Elektromotor Bafang BPM 36V, 500W [27]



### 3.3 Případová studie jízdních vlastností

Obsahem této kapitoly je zjistit jízdní vlastnosti navrhované koloběžky při použití výše uvedeného motoru. Výstupem bude přehled vlastností, jako zrychlení, rychlost, ujetá vzdálenost a velikost dojezdu, v závislosti na čase při různě silném protivětru nebo při stoupání do kopce. Jedná se o akceleraci z nulové rychlosti při plném výkonu motoru.

#### Grafická metoda - maximální rychlost:

Pomocí vzorců uvedených v kapitole 4.1.1 - Jízdní odpory, vypočítáme síly působící na jezdce při různých rychlostech od 0 do 30 km/h. Potřebný výkon potom vypočítáme podle vzorce 4.11. Zjištění maximální rychlosti provedeme grafickou metodou, a to proložení zjištěného potřebného výkonu (zátěž) a otáčkové charakteristiky motoru. Maximální rychlost odečteme na ose X v místě, kde nám zátěžová křivka protne křivku výkonu elektromotoru. [1]

#### Numerická metoda

Pro zjištění velikosti zrychlení, rychlosti a ujeté vzdálenosti při akceleraci z nulové rychlosti potřebujeme znát síly jízdních odporů a otáčkovou charakteristiku motoru. Základní předpoklad vychází z druhého Newtonova pohybového zákona, že síla potřebná pro akceleraci o velikosti a je:

$$F_T = m \cdot a \text{ [N]} \quad 3.12$$

kde:

$F_T$ [N]	akcelerující síla
$m$ [kg]	hmotnost koloběžky + jezdce
$a$ [m/s <sup>2</sup> ]	zrychlení koloběžky

Akcelerující sílu v našem případě tvoří elektromotor. Zjistíme ji z točivého momentu motoru a ponížíme ji o celkovou velikost sil jízdních odporů (vzorec 4.11) [1].

$$F_T = \left( \frac{M_K}{r_K} \right) - F_C \text{ [N]} \quad 3.13$$

kde:

$M_K$ [Nm]	točivý moment elektromotoru
$r_K$ [m]	poloměr poháněného kola
$F_C$ [N]	celková velikost jízdních odporů

Dosazením rovnice 4.13 do rovnice 4.12 získáme požadovanou velikost zrychlení:

$$a = \frac{\left( \frac{M_T}{r_K} \right) - F_C}{m} \text{ [m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad 3.14$$

Vypočítaná velikost zrychlení je dle 4.13 závislá na velikosti otáček motoru. Ty při znalosti poloměru poháněného kola převedeme na rychlost koloběžky v km/h. Ze závislosti zrychlení a rychlosti koloběžky zjistíme celkový čas akcelerace a dráhu.

### 3.4 Parametry případové studie

hmotnost koloběžky:	20 kg
hmotnost jezdce:	100 kg
sklon cesty:	0% až 6%
čelní plocha ve stoje:	0,500 m <sup>2</sup>
čelní plocha v předklonu:	0,404 m <sup>2</sup>
rychlost větru:	1 až 45 km/h
koef. aerod. odporu ve stoje:	1,00
koef. aerod. odporu v předklonu:	0,85
hustota vzduchu (300 m n.m.):	1,166 kg/m <sup>3</sup>
součinitel valivého odporu:	0,01
poloměr zadního kola:	0,25 m

Následující studie budou vypracovány s uvedenými parametry, proměnné jsou pouze sklon a rychlost větru (směr větru je proti jízdě). Důležitý je předpoklad jízdy na zpevněných cestách, nahuštění pneumatik na min. 3,5Bar. Vybrané stoupání 6% (úhel 10°) představuje průměrnou hodnotu na českých silnicích. U všech případů bude použita čelní plocha a koeficient aerodynamického odporu ve stoje. Pouze u situace protivětru o rychlosti 45 km/h bude uvažována i situace jízdy v předklonu, neboť se významně promítne do jízdních vlastností.

#### Rychlost větru 1 km/h

Dle Beaufortovy stupnice představuje tato rychlost nultý stupeň - bezvětří (kouř stoupá kolmo vzhůru, hladina moře tvoří zrcadlo). V tomto stavu je předpoklad zjištění maximální rychlosti koloběžky.

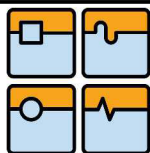
#### Rychlost větru 16 km/h

Jedná se o čtvrtý stupeň síly větru - mírný vítr (vítr zvedá prach a útržky papíru). Tato hodnota byla vybrána dle CHMI [28] jako hrubá průměrná rychlost v ČR. Je tedy pravděpodobné, že v blízkém okolí této rychlosti bude koloběžka většinou používána.

#### Rychlost větru 45 km/h

Tato rychlost představuje devátý ze sedmnácti stupňové škály síly větru - silný víchř (vítr strhává komíny, tašky a břidlice ze střech). Z praktického hlediska není pravděpodobné, že by se koloběžka používala hlavně v takovém počasí. Jedná se spíše o teoretickou demonstraci velikosti vzdušného odporu a možnost jeho ovlivnění zmenšením čelní plochy a koeficientu aerodynamického odporu pouhou změnou postoje - jízdou v předklonu.



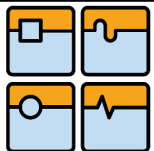


### 3.5 Numerické řešení:

Částečný přehled numerického řešení jízdních vlastností. Teoreticky nejvyšší dosažená rychlost koloběžky je 25 km/h při jízdě po rovině a bez protivětru. Za připomenutí stojí jistě zjištění, že jízda bez protivětru do 6 % stoupání je energeticky přibližně stejně náročná jako jízda po rovině s protivětrm o síle 45 km/h.

Tab. 4 - Výkon koloběžky - numerické řešení

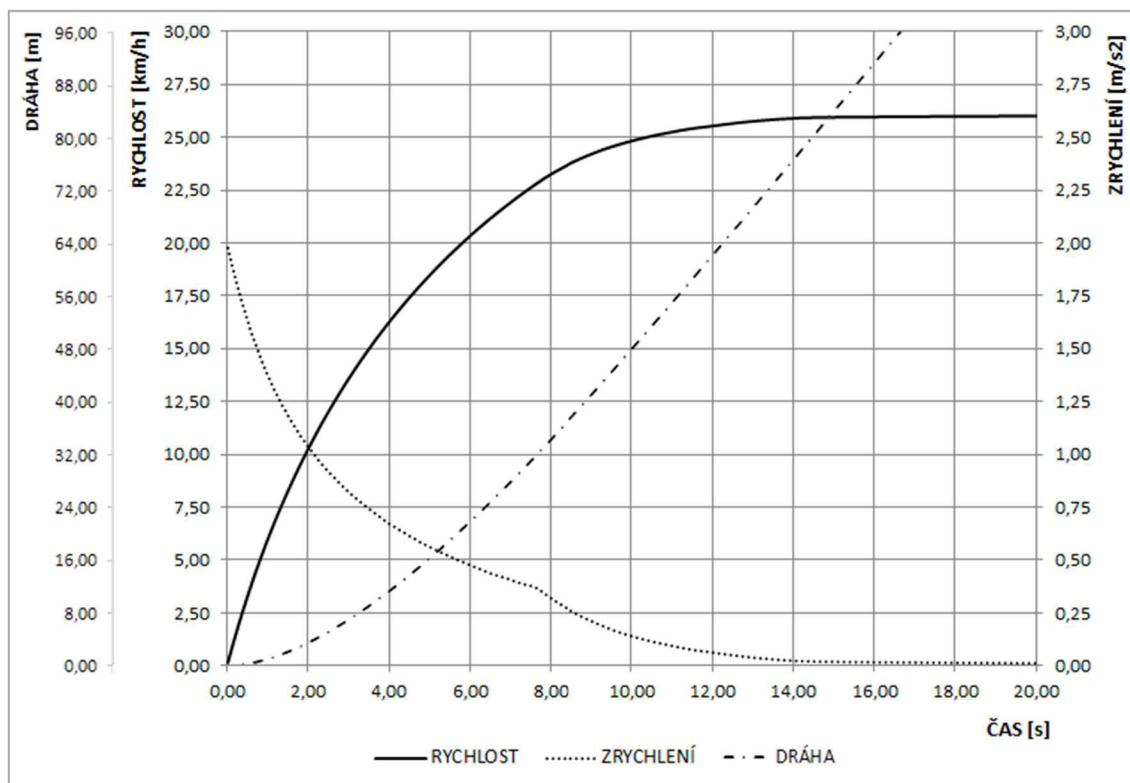
	OTÁČKY MOTORU [min <sup>-1</sup> ]	JÍZDNÍ ODPOR				JÍZDNÍ VLASTNOSTI				
		STOUPÁNÍ [W]	VZDUŠNÝ [W]	VALIVÝ [W]	CELKOVÝ [W]	RYCHLOST [m/s]	RYCHLOST [km/h]	ZRYCHLENÍ [m/s <sup>2</sup> ]	ČAS [s]	DRÁHA [m]
stoupání 0%, vítr 1 km/h	26,8	0,0	0,2	8,4	8,6	0,71	2,6	1,77	0,4	0,15
	52,0	0,0	1,1	16,3	17,4	1,38	5,0	1,54	0,8	0,58
	104,0	0,0	7,5	32,6	40,1	2,77	10,0	1,16	1,8	2,81
	157,5	0,0	24,4	49,3	73,7	4,19	15,1	0,87	3,2	7,87
	181,0	0,0	36,4	56,7	93,1	4,81	17,33	0,76	4,0	11,38
	209,5	0,0	55,6	65,6	121,2	5,57	20,1	0,65	5,1	17,03
	259,9	0,0	104,2	81,4	185,6	6,91	24,9	0,32	7,8	33,91
stoupání 0%, vítr 16 km/h	26,8	0,0	5,5	8,4	13,9	0,71	2,6	1,71	0,4	0,15
	52,0	0,0	13,7	16,3	30,0	1,38	5,0	1,47	0,8	0,61
	104,0	0,0	41,9	32,6	74,5	2,77	10,0	1,06	1,9	3,00
	157,5	0,0	91,0	49,3	140,3	4,19	15,1	0,74	3,5	8,76
	181,0	0,0	120,4	56,7	177,1	4,81	17,3	0,62	4,5	12,99
	209,5	0,0	163,0	65,6	228,6	5,57	20,1	0,49	5,8	20,21
	259,9	0,0	259,9	81,4	341,3	6,91	24,9	0,13	10,1	47,69
stoupání 0%, vítr 45 km/h	26,8	0,0	36,3	8,4	44,7	0,71	2,6	1,35	0,5	0,19
	52,0	0,0	77,7	16,3	94,0	1,38	5,0	1,08	1,0	0,79
	104,0	0,0	187,9	32,6	220,5	2,77	10,0	0,62	2,7	4,45
	157,5	0,0	340,1	49,3	389,4	4,19	15,1	0,25	6,3	17,44
	181,1	0,0	421,1	56,7	477,8	4,82	17,3	0,10	10,2	35,26
stoupání 0%, vítr 45 km/h postoj v předklonu	26,8	0,0	24,9	8,4	33,3	0,71	2,6	1,48	0,4	0,17
	52,0	0,0	53,4	16,3	69,7	1,38	5,0	1,23	0,9	0,71
	104,0	0,0	129,1	32,6	161,7	2,77	10,0	0,79	2,3	3,75
	157,5	0,0	233,6	49,3	282,9	4,19	15,1	0,45	4,7	12,28
	181,1	0,0	289,2	56,7	345,9	4,82	17,3	0,32	6,4	19,78
stoupání 6%, vítr 1 km/h	26,8	50,3	0,2	8,2	58,7	0,71	2,6	1,18	0,5	0,21
	52,0	97,7	1,1	16,0	114,8	1,38	5,0	0,96	1,2	0,90
	104,0	195,3	7,5	32,0	234,8	2,77	10,0	0,57	3,1	4,96
	157,5	295,8	24,4	48,4	368,6	4,19	15,1	0,28	6,6	17,68
	181,1	340,1	36,4	55,7	432,2	4,82	17,3	0,17	9,4	30,54
	209,5	393,5	55,6	64,4	513,5	5,57	20,1	0,06	16,5	67,82
stoupání 6%, vítr 16 km/h	26,8	50,3	5,5	8,2	64,0	0,71	2,6	1,12	0,6	0,22
	52,0	97,7	13,7	16,0	127,4	1,38	5,0	0,88	1,2	0,96
	104,0	195,3	41,9	32,0	269,2	2,77	10,0	0,47	3,4	5,63
	157,5	295,8	91,0	48,4	435,2	4,19	15,1	0,15	8,6	24,59
	181,1	340,1	120,4	55,7	516,2	4,82	17,3	0,03	16,9	63,01



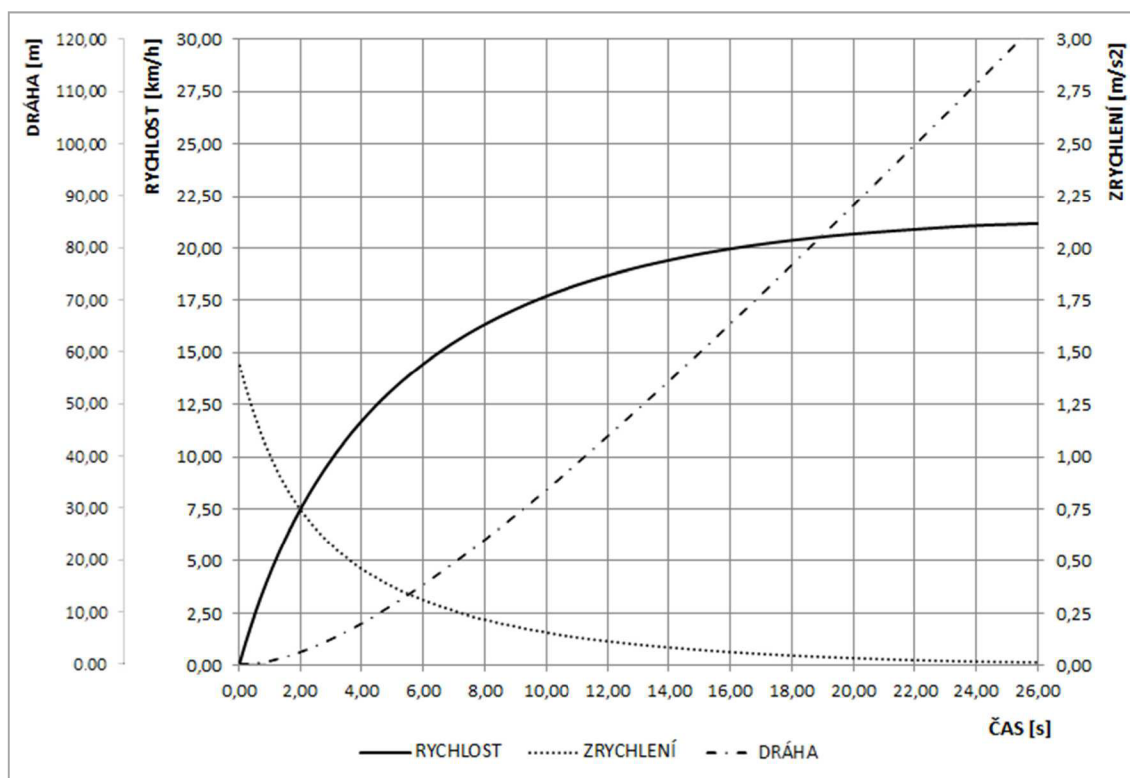
## DIPLOMOVÁ PRÁCE

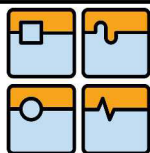
Na základě zjištěných hodnot můžeme pro lepší přehled zakreslit závislost zrychlení, rychlosti a dráhy na čase pro každý počítaný případ. Pro demonstraci jsou uvedeny dva případy:

Graf 1 - stoupání 0%, protivítr 16 km/h



Graf 2 - stoupání 6%, protivítr 1 km/h



**Shrnutí výsledků numerického řešení:**

Dle výpočtů byly zjištěny následující teoretické předpoklady jízdních vlastností konstruované koloběžky:

**Tab. 5 - Výsledky numerického řešení**

	POČÁTEČNÍ ZRYCHLENÍ [ms <sup>-2</sup> ]	NEJVYŠŠÍ RYCHLOST [km/h]	CELKOVÁ DRÁHA [m]	CELKOVÝ ČAS [S]
stoupání 0%, vítr 1 km/h	2,03	27,8	84,2	14,5
stoupání 0%, vítr 16 km/h	1,98	25,9	80,5	14,7
stoupání 0%, vítr 45 km/h	1,63	18,9	86,8	20,2
stoupání 0%, vítr 45 km/h, předklon	1,76	23,1	91,8	18,5
stoupání 6%, vítr 1 km/h	1,44	21,1	115,9	24,7
stoupání 6%, vítr 16 km/h	1,39	17,7	80,6	20,5

**3.6 Grafické řešení**

Pomocí grafického řešení můžeme jednoduchým odečtem z grafu získat informaci o maximální dosažené rychlosti a velikosti dojezdu. Základní tvar grafu je tvořen závislostí výkonu motoru a baterie na rychlosti koloběžky. Hodnoty výkonu jsou získány z otáčkové charakteristiky[27]. Rychlost koloběžky je přepočítána z otáček motoru dle vztahu[4]:

$$v_K = \frac{n \cdot \pi \cdot d_K \cdot 60}{1000} \text{ [km/h]} \quad 3.15$$

kde:

n [ot/min]

otáčky elektromotoru

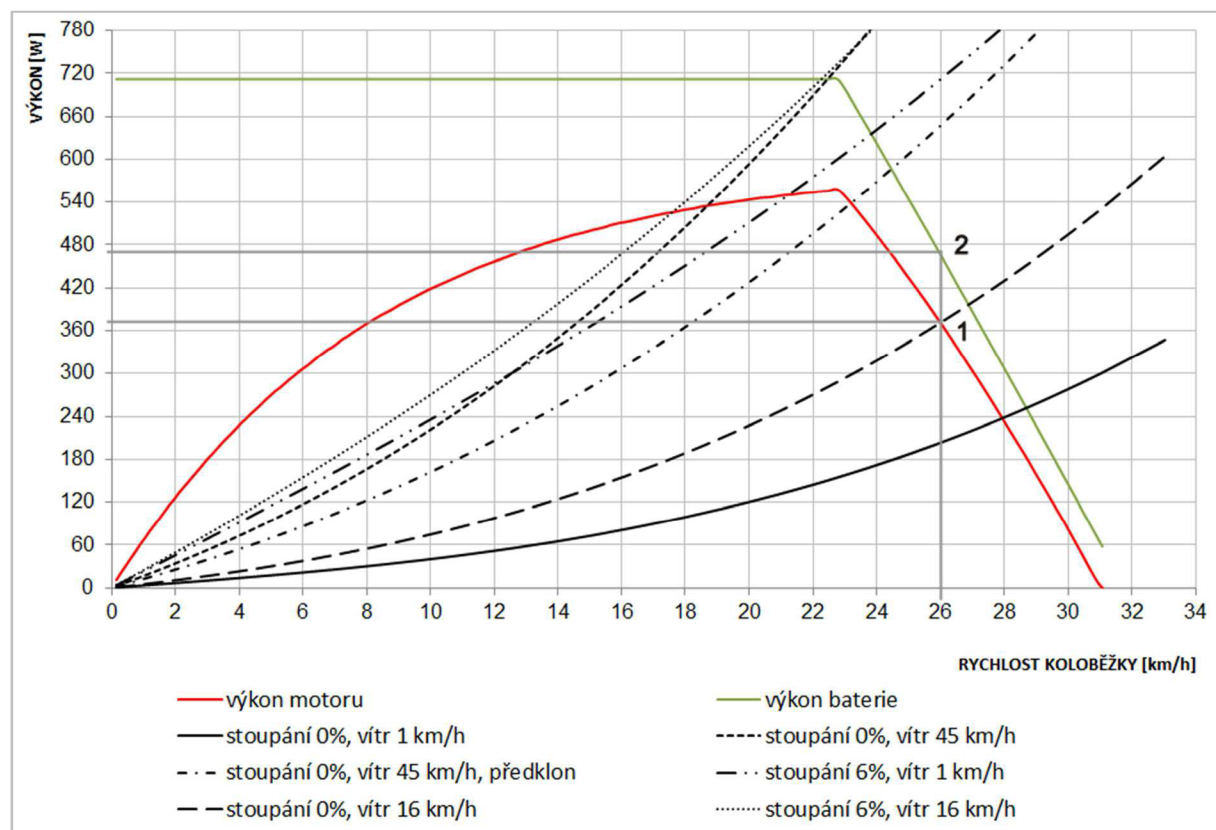
d<sub>K</sub> [m]

průměr poháněného kola (20"; tj. 0,504m)

Dále jsou do grafu zaneseny zátěžové křivky jízdních režimů. Zátěžová křivka představuje vlastně velikost celkového jízdního odporu (W) v závislosti na rychlosti koloběžky. Její hodnota je vypočítána v numerické části a je vyčíslena v Tab. 4..



Graf 3 - Zátěžová charakteristika koloběžky

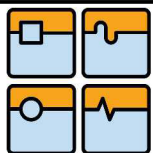


Bod 1 v grafu 3.3, kde zátěžová křivka protne výkonovou křivku motoru, představuje maximální rychlost, kterou koloběžka při dané zátěži vyvine. Při této rychlosti bude výkon baterie odpovídat hodnotě v bodě 2. Na základě těchto hodnot a vlastností použité baterie můžeme odhadnout velikost maximálního dojezdu koloběžky (při konstantní rychlosti koloběžky dle bodu 1). Při použití 36V LiFePO4 baterie o kapacitě 10Ah bude teoretický dojezd koloběžky:

Tab. 6 - Velikost dojezdu koloběžky

	RYCHLOST [km/h]	VÝKON MOTORU [Wh]	VÝKON BATERIE [Wh]	DOJEZD [km]
stoupání 0%, vítr 1 km/h	27,8	235,0	325,0	30,8
stoupání 0%, vítr 16 km/h	25,9	370,0	470,0	19,9
stoupání 0%, vítr 45 km/h	18,9	530,0	710,0	9,6
stoupání 0%, vítr 45 km/h, předklon	23,1	535,0	690,0	12,0
stoupání 6%, vítr 1 km/h	21,1	550,0	710,0	10,7
stoupání 6%, vítr 16 km/h	17,7	516,0	710,0	8,9

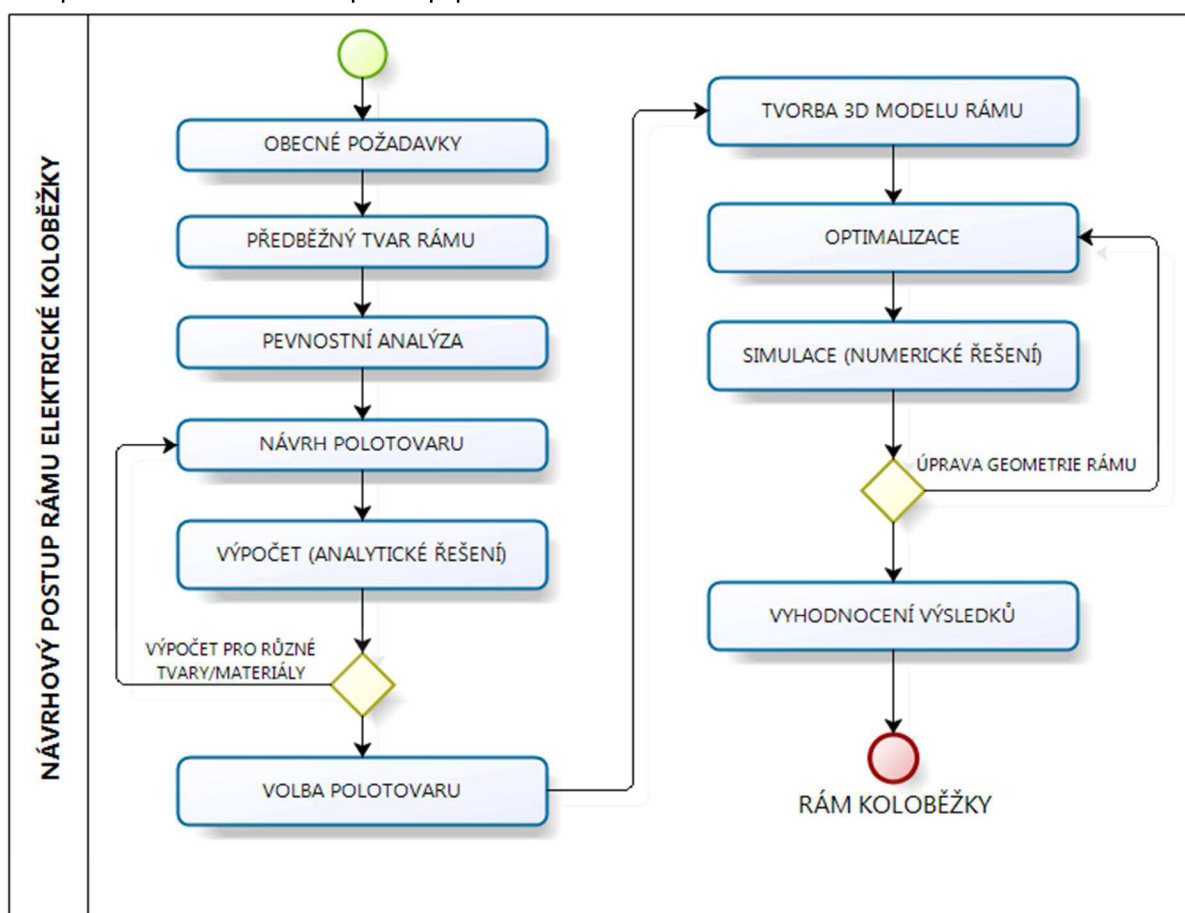
Pozn.: Uvedené hodnoty dojezdu platí při použití řídicí jednotky, která dodává elektromotoru proud o maximální hodnotě 20A.



#### 4 Návrh konstrukce rámu

Rám je vedle samotného pohonu nejdůležitější část při navrhování konstrukce koloběžky. Obecné požadavky jsou vysoká tuhost a nízká hmotnost. V našem případě bude důležitá i vhodná geometrie, respektive nízká výška nášlapu a nízká poloha těžiště. Materiálový předpoklad je nelegovaná konstrukční ocel, z důvodu výborné obrobitelnosti a svařitelnosti a taky široké dostupnosti, jak skladové, tak i cenové. Vhodnost použití jiných materiálů bude zhodnocena až po pevnostní analýze, která následuje v této kapitole. Rám bude povrchově upraven, na některá místa bude umístěna nerezová ochrana, zabraňující otěru a následnému rezivění.

Pro přehlednost uvádím postup procesem návrhu rámu:



Obr. 26 - Návrhový postup rámu elektrické koloběžky

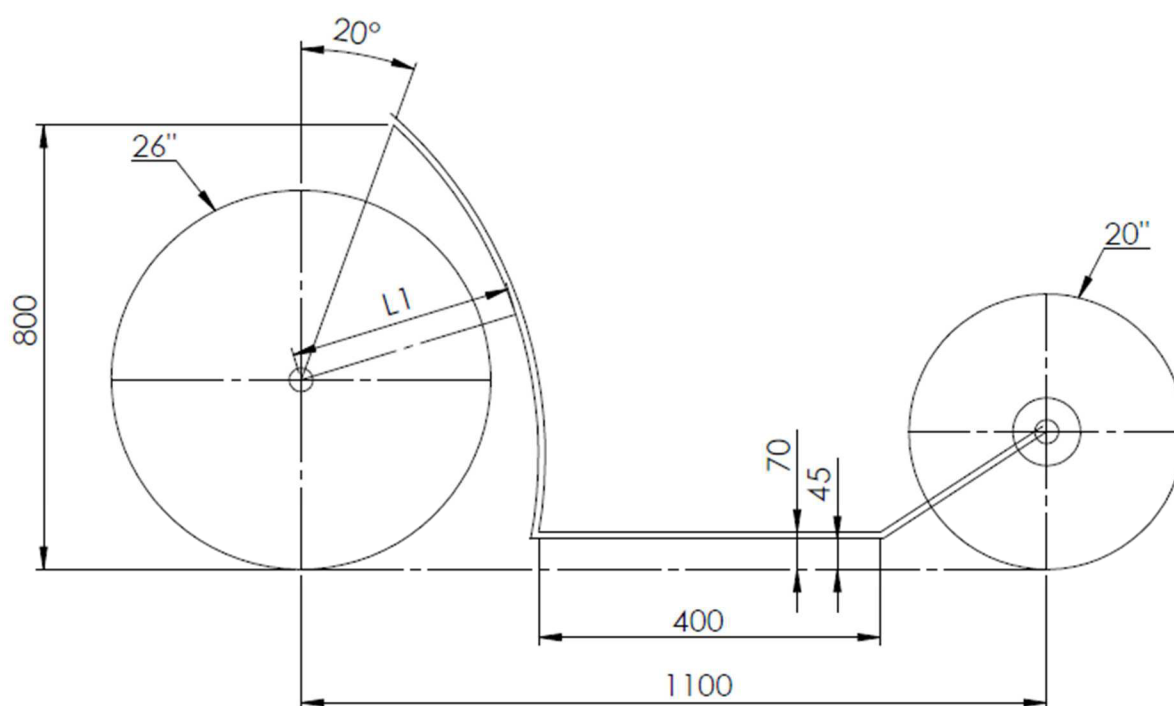
Prvotní fáze procesu popisuje, co se bude konstruovat a jaké jsou požadované cíle. Na základě toho bude zvolen zjednodušený 2D tvar rámu, který bude podroben pevnostní analýze. Ta sestává ze zjištění silového působení na rám koloběžky při situaci, kdy je koloběžka stacionární (rám je zatížen tíhovou silou jezdce a momentem od elektromotoru) a při silném brzdění (rám je zatížen tíhovou silou a tíhovým zrychlením jezdce). Pro různé průřezy a materiály je pak pomocí analytických výpočtů zjištěna bezpečnost k meznímu stavu pružnosti v místech největšího silového namáhání (zjištěno z výsledných vnitřních účinků). Na základě těchto výsledků bude zvolen polotovár, ze kterého bude rám koloběžky vyroben.

Druhá fáze spočívá v modelování (designu) rámu tak, aby splnil obecné předpoklady a současně byl z výrobního hlediska efektivní. Model bude průběžně podroben numerické simulaci pomocí FEM analýzy. Ta bude zahrnovat silové působení na rám koloběžky jako v analytické. Výstupem tohoto celého procesu je konečná verze rámu, který bude později doplněn o nosič, ve kterém bude umístěna baterie a řídicí jednotka motoru.

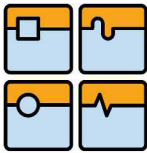
#### 4.1 Obecné požadavky

Konstruovat se bude koloběžka neskladná, určená pro aktivní delší jízdu (>30km). Tedy tvar rámu bude vycházet ze sportovních koloběžek, které jsou spíše určeny pro dospělé uživatele. Rám musí splňovat následující požadavky (rozměry byly zvoleny na základě průzkumu trhu):

- nosnost minimálně 100 kg
- hmotnost do 20 kg
- konstrukce z ohýbaných profilů
- práškově lakováno
- světlá výška 45-55 mm
- délka nášlapu minimálně 400 mm
- velikost předního ráfku 26" a zadního 20" (559 / 406 mm)
- šířka rámu v místě pro uchycení elektromotoru minimálně 110 mm
- co nejmenší vzdálenost předního kola od rámu (L1)
- náklon přední vidlice 20° - voleno dle doporučení [3] s ohledem na snadné řízení a nenáročnou jízdu
- výška hlavového uložení minimálně 800
- rozvor kol minimálně 1100



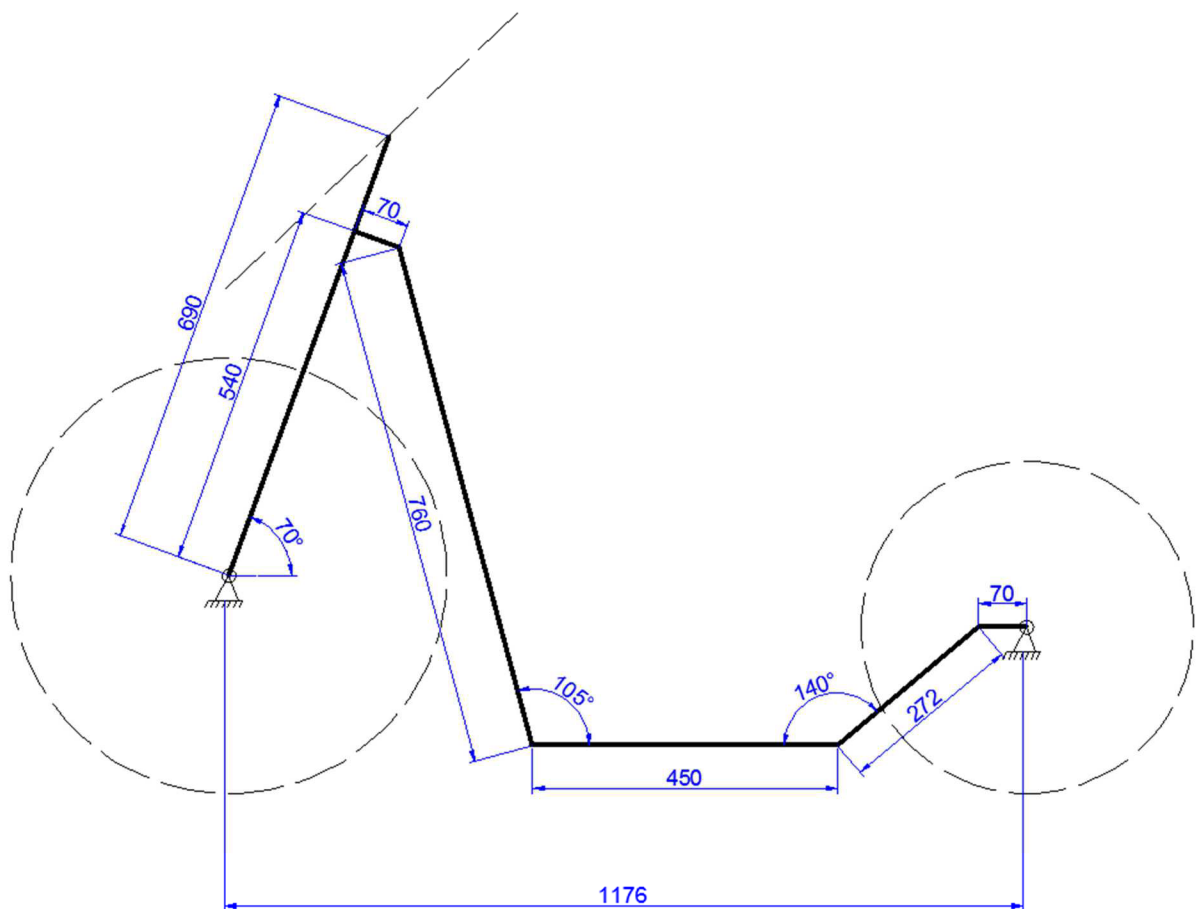
Obr. 27 - Ilustrativní zobrazení koloběžky



## 4.2 Pevnostní analýza

Rám koloběžky bude zatěžován od tíhové síly jezdce a od krouticího momentu motoru. Ten je největší v případech, kdy koloběžka stojí a jezdec náhle maximálně přidá na otočném regulátoru. Tíhová síla jezdce se promítne do spodní části rámu a při ostrém brzdění ještě současně do řídítek. Při nedostatečném návrhu jednotlivých částí rámu by mohlo dojít k jeho ohnutí nebo dokonce i praskání. Tomu se budeme snažit vyhnout pomocí analytického a numerického výpočtu napětí a průhybu.

**Analytické řešení** předpokládá zjednodušený model:



Obr. 28 - Zjednodušený model koloběžky

Zjednodušený model rámu představuje obecnou rovinnou soustavu prutových těles. Rám je zalomený prut a tvoří jedno těleso. Uložen je nepohyblivě pomocí dvou vazeb rotačních. Prutové předpoklady jsou splněny, s výjimkou míst, kde se střednice prutu láme. Mezi těmito místy zůstává střednice v procesu deformace spojitá a hladká. Příčný průřez je jednonásobně souvislá oblast, ohraničená obrysou křivkou.

### 4.3 Analytické řešení - rozjezd

Provedeme celkové uvolnění a zaneseme vnější zatížení. To je způsobeno od točivého momentu motoru a tíhové síly jezdce na koloběžku.

#### Parametry zatížení:

Tíhová síla:

$$F_G = mg \text{ [N]} \quad 4.1$$

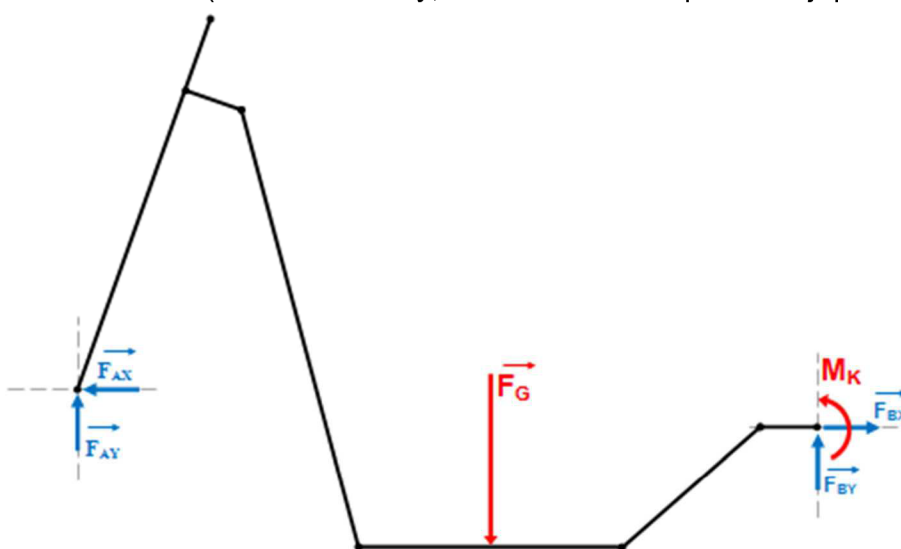
$$F_G = 100 \cdot 9.81 \cong 1000 \text{ N}$$

kde:

$m$  [kg] hmotnost jezdce

Točivý moment dle [27]:  $M_k = 65 \text{ Nm}$

**Úplné uvolnění tělesa:** (2 rotační vazby, každou vazbu reprezentují právě 2 síly)



Obr. 29 - Uvolněné těleso koloběžky - rozjezd

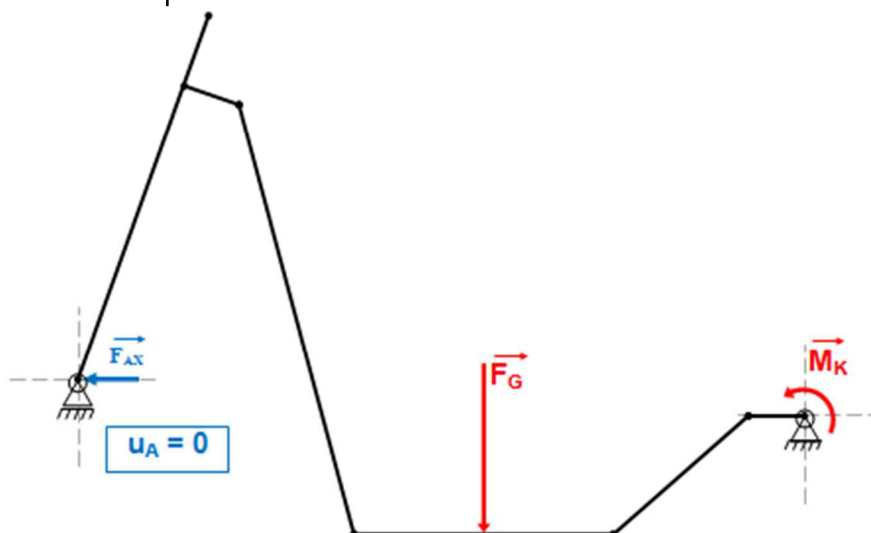
#### Statický rozbor:

$\vartheta = 3$  počet použitelných podmínek (obecná rovinná soustava)

$\mu = 4$  počet neznámých parametrů – síly ve vazbách ( $F_{Ay}, F_{Ax}, F_{By}, F_{Bx}$ )

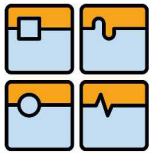
$s = \mu - \vartheta = 1$  úloha je 1x staticky neurčitá:

- provedeme částečné uvolnění (uvažujeme sílu  $F_{ax}$  jako známé vnější zatížení) a zavedeme deformační podmínku:

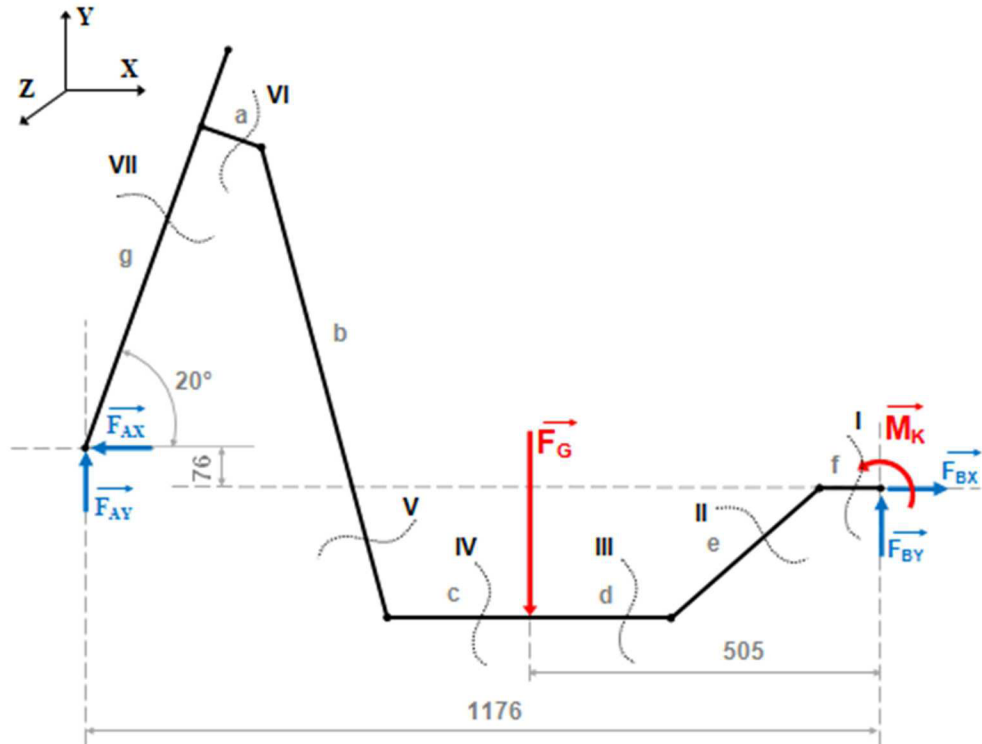


Obr. 30 - Částečné uvolnění - rozjezd





Z podmínek statické rovnováhy vyjádříme stykové síly jako podmínky SR funkce  $F_{AX}$ :



Obr. 31 - Statický rozbor - rozjezd

$$\sum F_x = 0: F_{BX} - F_{AX} = 0$$

$$\sum F_y = 0: F_{AY} + F_{BY} - F_G = 0$$

$$\sum M_B = 0: M_K + F_G \cdot 0.505 - F_{AY} \cdot 1.176 + F_{AX} \cdot 0.076 = 0$$

Vyjádření sil  $F_{BX}$  a  $F_{BY}$  jako funkci síly  $F_{AX}$ :

$$F_{BX} = F_{AX}; \quad F_{BY} = F_G - F_{AY};$$

$$F_{AY} = \frac{M_K + F_G \cdot 0.505 + F_{AX} \cdot 0.076}{1.176}$$

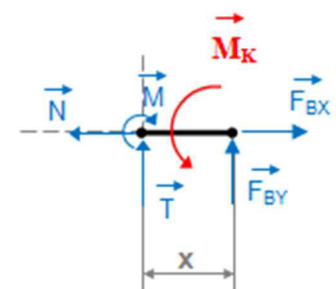
**Silový rozbor v jednotlivých místech rámu (I – VII):**

Řez 1,  $x \in (0; f)$

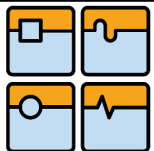
$$N1(x) = F_{BX}$$

$$T1(x) = -F_{BY}$$

$$M_{O1}(x) = M_K + F_{BY} \cdot x$$



Obr. 32 - Řez 1



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

Řez 2,  $x \in (0; e)$

$$N2(x) = F_{BX} \cos(40) + F_{BY} \sin(40)$$

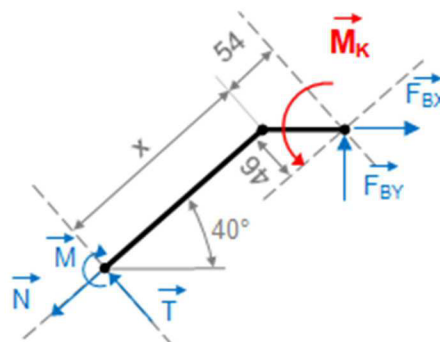
$$T2(x) = F_{BX} \sin(40) - F_{BY} \cos(40)$$

$$M_{O_2}(x) = M_K + F_{BY} \cos(40) (0.054 + x)$$

$$+ F_{BY} \sin(40) 0.046$$

$$+ F_{BX} \cos(40) 0.046$$

$$- F_{BX} \sin(40) (0.054 + x)$$



Obr. 33 - Řez 2

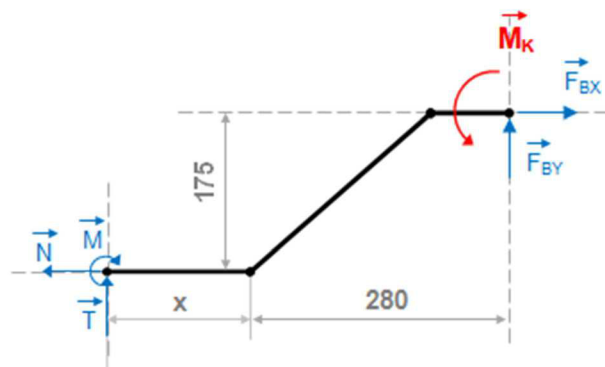
Řez 3,  $x \in (0; d)$

$$N3(x) = F_{BX}$$

$$T3(x) = -F_{BY}$$

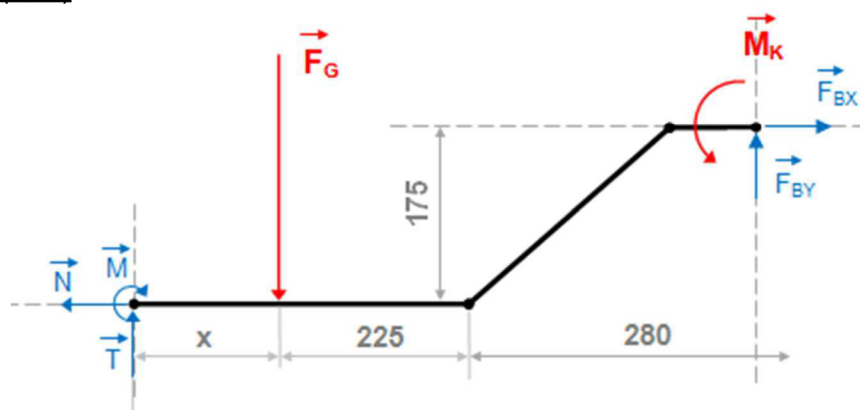
$$M_{O_3}(x) = F_{BY} (0.280 + x) -$$

$$- F_{BX} (0.175) + M_K$$



Obr. 34 - Řez 3

Řez 4,  $x \in (0; c)$

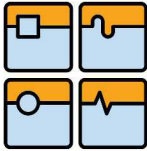


Obr. 35 - Řez 4

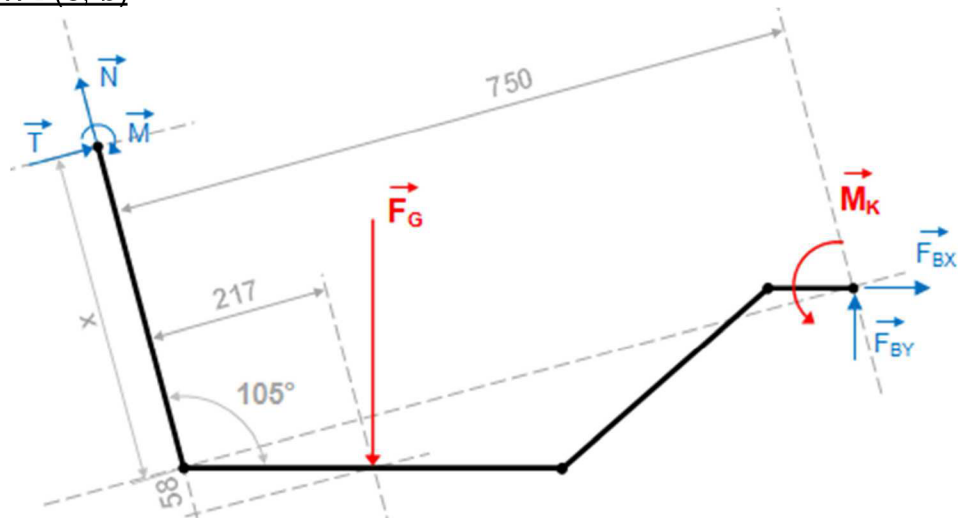
$$N4(x) = F_{BX}$$

$$T4(x) = F_G - F_{BY}$$

$$M_{O_4}(x) = F_{BY} (0.505 + x) - F_{BX} (0.175) + M_K - F_G x$$



Řez 5,  $x \in (0; b)$



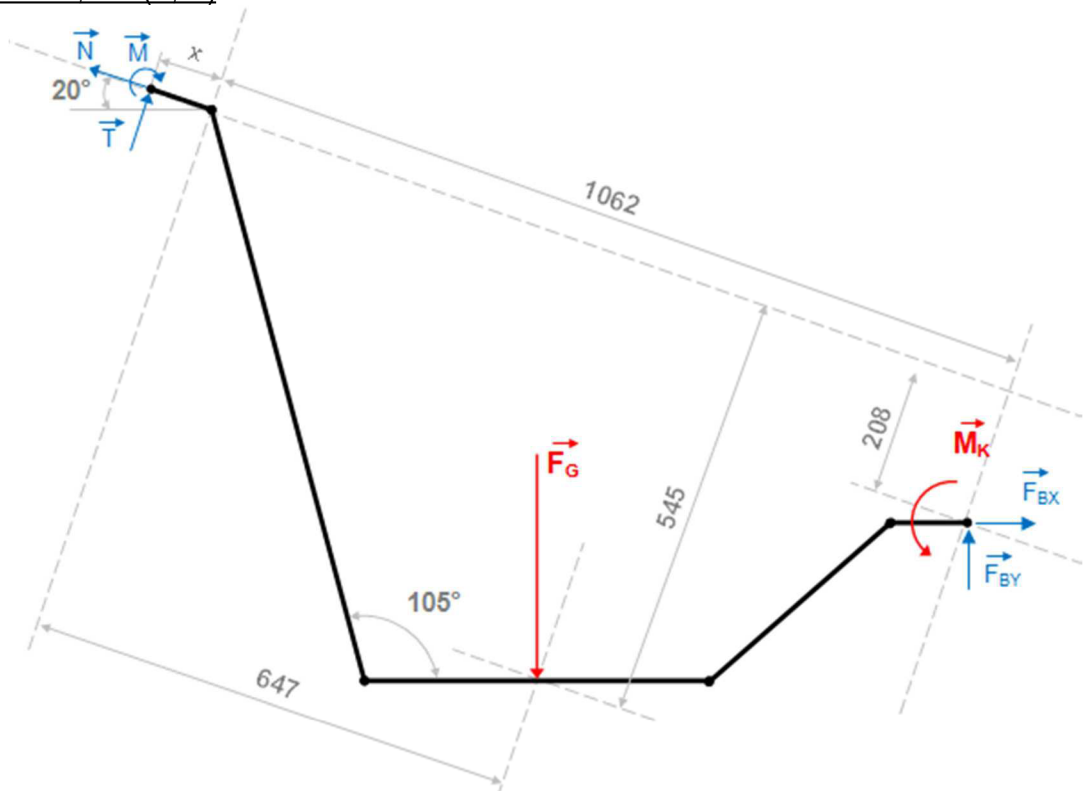
Obr. 36 - Řez 5

$$N5(x) = F_G \cos(15) - F_{BY} \cos(15) + F_{BX} \sin(15)$$

$$T5(x) = F_G \sin(15) - F_{BY} \sin(15) - F_{BX} \cos(15)$$

$$M_{O_5}(x) = -F_G \cos(15) 0.217 - F_G \sin(15) (0.058 + x) + F_{BY} \cos(15) 0.750 + \\ + F_{BY} \sin(15) x + F_{BX} \cos(15) x - F_{BX} \sin(15) 0.750 + M_K$$

Řez 6,  $x \in (0; a)$



Obr. 37 - Řez 6



DIPLOMOVÁ PRÁCE

$$N_6(x) = F_G \sin(20) - F_{BY} \sin(20) + F_{BX} \cos(20)$$

$$T_6(x) = F_G \cos(20) - F_{BY} \cos(20) - F_{BX} \sin(20)$$

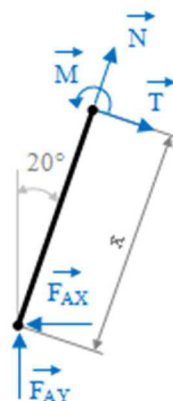
$$M_{o_6}(x) = -F_G \cos(20) (0.647 + F_G \sin(20) 0.545 + F_{BY} \cos(20) (1.062 + x) - F_{BY} \sin(20) 0.208 + F_{BX} \cos(20) 0.208 + F_{BX} \sin(20) (1.062 + x) + M_K$$

Řez 7,  $x \in (0; h)$

$$N_7(x) = -F_{AX} \sin(20) + F_{AY} \cos(20)$$

$$T_7(x) = F_{AY} \sin(40) + F_{AX} \cos(40)$$

$$M_o(x) = F_{AX} \cos(20) x + F_{AY} \sin(20) x$$



Obr. 38 - Řez 7

**Vyjádření deformační podmínky a výpočet stykových sil:**

Prut je zatížený kombinací tahu, smyku a ohybu. Jelikož je délka střednice řádově větší, než je zamýšlený největší rozměr průřezu ( $< 0.050$ ), bude pro vyjádření deformačních podmínek podstatný jen ohybový moment  $M_o$ . Příspěvek deformace od normálové síly  $N$  a posouvající  $T$  bude proti deformaci od  $M_o$  zanedbatelný.

Pro vyjádření deformačních podmínek využijeme Castiglianovu větu. Z VVÚ vystupují jenom síly  $F_{BX}$  a  $F_{BY}$ ,  $F_{AX}$  a  $F_{AY}$ , ty jsme vyjádřili jako funkční závislost síly  $F_{AX}$ . Velikost posunutí v bodě A je z deformační podmínky rovno 0 a je vyjádřeno:

$$u_A = \frac{dW}{dF_{AX}} = \int_0^l \frac{M_o(\varphi) dM_o(\varphi)}{EJ dF_{AX}} ds =$$

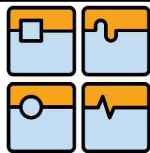
$$= \frac{1}{EJ} \left[ \int_0^h M_{o_7} \frac{dM_{o_7}(x)}{dF_{AX}} dx + \int_0^a M_{o_6} \frac{dM_{o_6}(x)}{dF_{AX}} dx + \int_0^b M_{o_5} \frac{dM_{o_5}(x)}{dF_{AX}} dx + \right.$$

$$\left. + \int_0^c M_{o_4} \frac{dM_{o_4}(x)}{dF_{AX}} dx + \int_0^d M_{o_3} \frac{dM_{o_3}(x)}{dF_{AX}} dx + \int_0^e M_{o_2} \frac{dM_{o_2}(x)}{dF_{AX}} dx + \right.$$

$$\left. + \int_0^f M_{o_1} \frac{dM_{o_1}(x)}{dF_{AX}} dx \right]$$

Z výše uvedeného vyjádříme velikost síly  $F_{AX}$ :

$$F_{AX} = \underline{\underline{-28 \text{ N}}}$$



Kde:

$E$  [Pa]

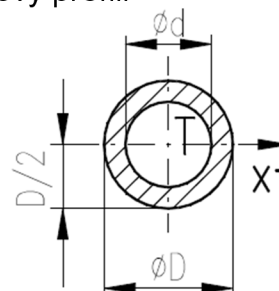
modul pružnosti v tahu

$J$  [m<sup>4</sup>]

osový kvadratický moment průřezu

V případě naší konstrukce budeme uvažovat dutý kruhový profil.

$$J_{xT} = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} \text{ [m}^4\text{]} \quad 4.2$$



Obr. 39 - Mezikruží

Nyní provedeme zpětné dosazení zjištěné síly  $F_{AX}$  a vnější zatížení  $M_K$  a  $F_G$  do podmínek statické rovnováhy a budeme řešit soustavu rovnic (viz obrázek 31):

$$F_{AX} - F_{BX} = 0$$

$$F_{AY} + F_{BY} - F_G = 0$$

$$M_K + F_G \cdot 0.505 - F_{AY} \cdot 1.177 + F_{AX} \cdot 0.076 = 0$$

Výsledná velikost stykových sil:

$$F_{AX} = F_{BX} = -28 \text{ N}$$

$$F_{AY} = 483 \text{ N}$$

$$F_{BY} = 517 \text{ N}$$

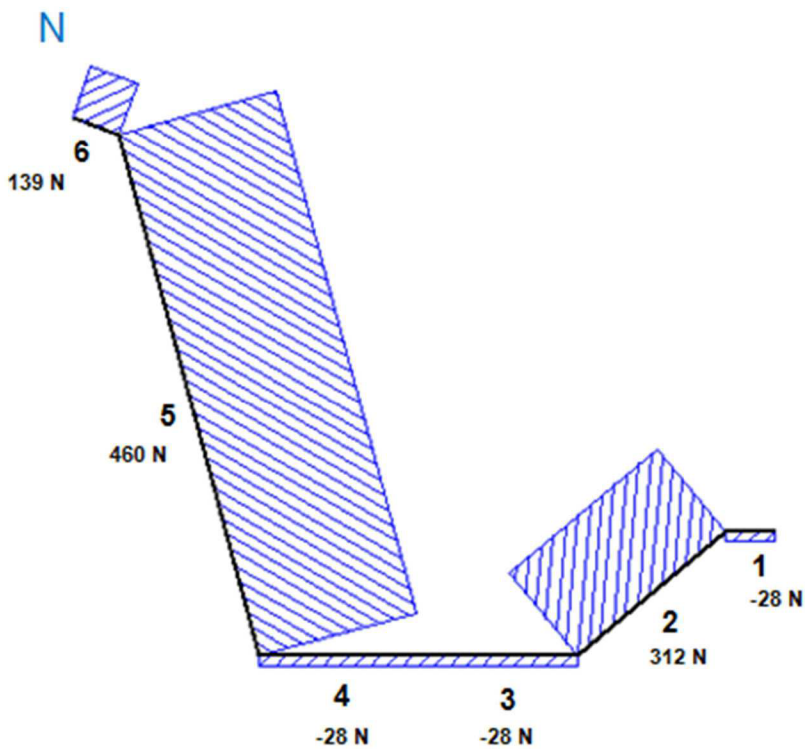
Nyní když známe velikosti stykových sil, můžeme provést zpětné dosazení do VVÚ a znázornit průběh napětí a ohybového momentu v prutu. Vidlici koloběžky zanedbáváme, jelikož se navrhuje rám a vidlice se kupuje jako hotový produkt.

$N_1 = -28 \text{ N}$ $T_1 = -517 \text{ N}$ $Mo_1(0) = 65 \text{ Nm}$ $Mo_1(0.070) = 101 \text{ Nm}$	$N_2 = 312 \text{ N}$ $T_2 = -414 \text{ N}$ $Mo_2(0) = 102 \text{ Nm}$ $Mo_2(0.272) = 214 \text{ Nm}$	$N_3 = -28 \text{ N}$ $T_3 = -517 \text{ N}$ $Mo_3(0) = 214 \text{ Nm}$ $Mo_3(0.225) = 331 \text{ Nm}$
$N_4 = -28 \text{ N}$ $T_4 = 483 \text{ N}$ $Mo_4(0) = 331 \text{ Nm}$ $Mo_4(0.225) = 223 \text{ Nm}$	$N_5 = 460 \text{ N}$ $T_5 = 151 \text{ N}$ $Mo_5(0) = 221 \text{ Nm}$ $Mo_5(0.760) = 106 \text{ Nm}$	$N_6 = 139 \text{ N}$ $T_6 = 463 \text{ N}$ $Mo_6(0) = 108 \text{ Nm}$ $Mo_6(0.070) = 75 \text{ Nm}$



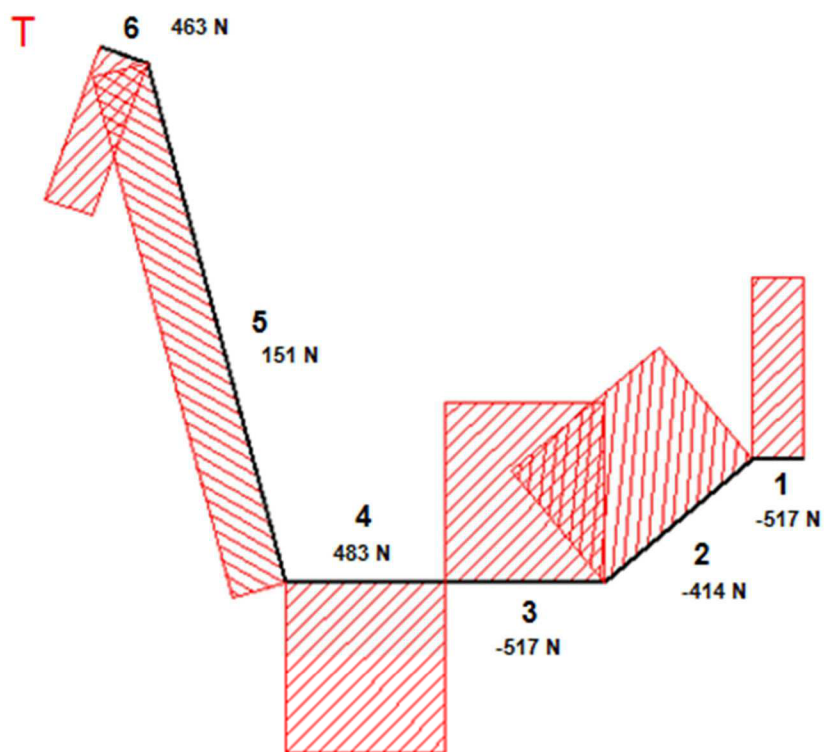
**Grafické znázornění průběhu VVÚ:**

Normálová síla N:

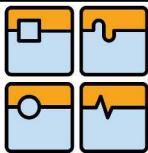


Obr. 40 - VVÚ rozjezd - N

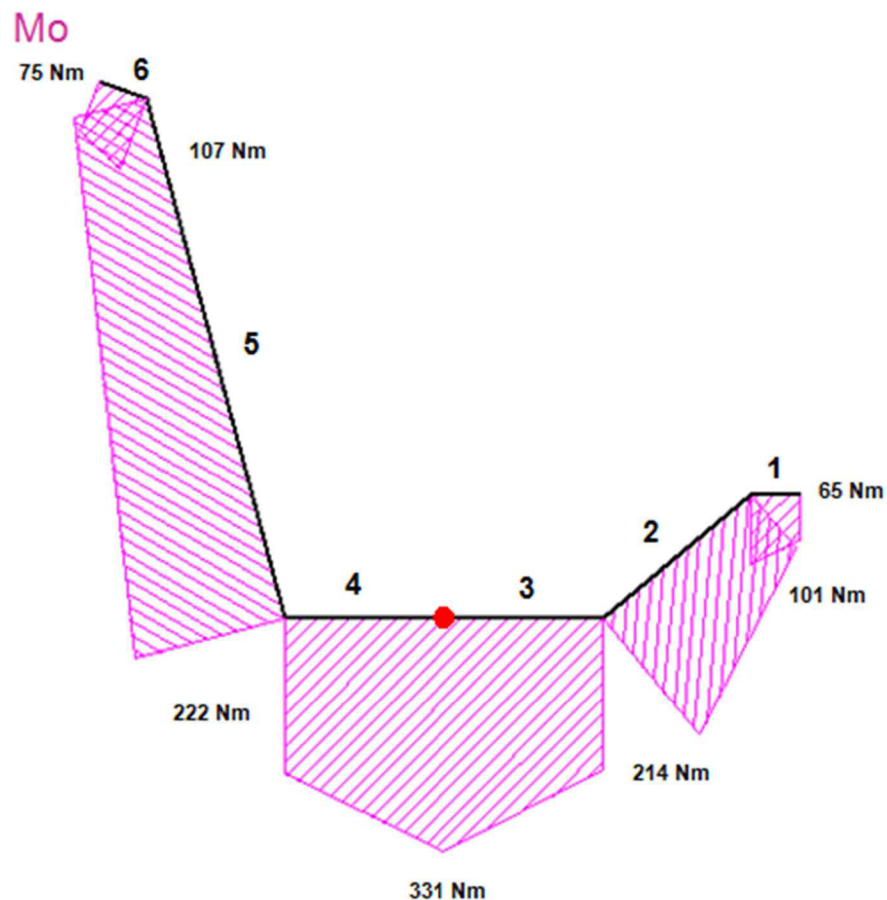
Posouvající síla:



Obr. 41 - VVÚ rozjezd - T



Ohybový moment:



Obr. 42 - VVÚ rozjezd -  $M_o$

### Kontrola mezního stavu pružnosti a maximálního posunutí:

Zaměříme se na kontrolu mezního stavu pružnosti v místě nebezpečného průřezu, který je označen červeně (místo největšího ohybového momentu). Další nebezpečná místa se nacházejí v zalomení střednice prutu. Je předpoklad, že tyto místa představují určité koncentrátoři napětí. Tyto místa budou ovšem více podrobena šetření při numerickém řešení modelu. Dále se zaměříme na celkový posun prutu v místě největšího ohybového momentu. Tyto výpočty budou provedeny pro více druhů průřezů pomocí následujících vztahů:

Maximální napětí:

$$\sigma_{max} = \frac{M_o}{W_o} [Pa] \quad 4.3$$

kde:

$M_o$  [Nm]

ohybový moment

$W_o$  [m<sup>3</sup>]

modul průřezu v ohybu, který je pro kruhový průřez:

$$W_o = \frac{\pi D^3}{32} \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^4 \right] [m^3] \quad 4.4$$

kde  $D$  a  $d$  jsou charakteristiky průřezu viz obrázek 39.

Bezpečnost k meznímu stavu pružnosti:

$$K_p = \frac{R_e}{\sigma_{max}} [-] \quad 4.5$$

kde:

Re [MPa]                      mez kluzu  
 $\sigma_{max}$  [MPa]                maximální napětí

Normálové napětí (tah/tlak):

Napětí od normálové síly (N) v našem případě můžeme zanedbat, jelikož jeho velikost je oproti napětí ohybovému napětí řádově menší. Pro tah/tlak platí  $\sigma_N = \frac{N}{S}$  a pro ohyb  $\sigma_{Mo} = \frac{M_o}{W_o}$ , a když do těchto vztahů dosadíme, zjistíme, že  $\sigma_N \ll \sigma_{Mo}$ .

Velikost posunutí v místě působení síly  $F_G$ :

Posunutí vypočítáme pomocí Castiglianovi věty, jejíž obecné vyjádření je:

$$u_{Fg} = \frac{dW}{dF_G} = \int_0^{\pi} \frac{Mo(\varphi)}{EJ} \frac{dMo(\varphi)}{dF_G} ds \quad 4.6$$

kde:

E [Pa]                      modul pružnosti v tahu, pro ocel =  $2.1 \cdot 10^{11}$  Pa, hliník =  $7.0 \cdot 10^{10}$  Pa  
J [m<sup>4</sup>]                      osový kvadratický moment průřezu, viz vzorec 4.1

Postup výpočtu je analogický jako v případě částečného uvolnění. Nejdříve ovšem musíme vyjádřit z podmínek statické rovnováhy velikosti sil  $F_{BY}$ ,  $F_{BX}$ ,  $F_{AY}$  jako funkční závislost na síle  $F_G$  (viz obrázek 31, kde již ale síla  $F_{AX}$  vystupuje jako známý parametr):

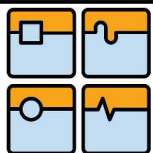
$$F_{AY} = \frac{M_K + F_G 0.505 + F_{AX} 0.076}{1.177}$$

$$F_{BY} = F_G - F_{AY}$$

$$F_{BX} = F_{AX}$$

Prut je zatížený kombinací tahu, smyku a ohybu. Jelikož je délka střednice řádově větší, než je zamýšlený největší rozměr průřezu ( $< 0.050$ ), bude pro vyjádření deformačních podmínek podstatný jen ohybový moment  $M_o$ . Příspěvek deformace od normálové síly  $N$  a posouvající  $T$  bude proti deformaci od  $M_o$  zanedbatelný. Dosadíme výše odvozené rovnice stykových sil do rovnic VVÚ a následně můžeme již použít vzorec 4.5 a vypočítat průhyb v místě působení síly  $F_G$





## Vyhodnocení:

Tab. 7 – Výsledek analytické části 1

Č.	ROZMĚR [mm]	MATERIÁL	MEZ KLUZU [MPa]	NAPĚTÍ [MPa]	POSUNUTÍ [mm]	BEZPEČNOST K MSP [-]
1	Ø 15 x 2,5 (2)	11353.1	235	623	13	0,4
2	Ø 20 x 2,5 (2)			310	5	0,8
3	Ø 20 x 5,0 (2)			225	4	1,0
4	Ø 25 x 3,0 (2)			183	2	1,3
5	Ø 35 x 5,0 (1)			171	1	1,4
6	Ø 25 x 2,5 (2)	AW 6060	170	183	7	0,9
7	Ø 35 x 5,0 (1)			171	2	1,0

Pozn.: Vnější rozměr x tloušťka stěny, číslo v závorce udává, že konstrukce rámu je tvořena jednou nebo dvěma trubkami. Materiál 11353.1 – nelegovaná konstrukční ocel, normalizačně žíhaná, výborná svařitelnost a obrobiteľnosť. Materiál AW 6060 – slitina hliníku AlMgSi, po rozpouštěcím žíhání a umělém stárnutí, zaručená svařitelnost a obrobiteľnosť.

Z výsledku analytické části byly pro další postup předběžně zvoleny polotovary č. 3 a č. 4 a potenciálně i polotovar č. 2. Polotovar č. 5 nebyl zvolen z důvodu velkých rozměrů, kdy by došlo k nežádoucímu zvětšení světlé výšky nášlapu koloběžky. Polotovary z pevnějších hliníkových slitin nebyly v analýze zahrnuty jak z důvodu finančního, tak i z důvodu dostupnosti a obrobiteľnosti, která klesá s velikostí jejich tvrdosti.

#### 4.4 Analytické řešení – brzdění

Toto analytické řešení se zabývá rozbořem napětí, které vzniká v rámu koloběžky při prudkém zastavení. V těžišti jezdce působí tíhová síla  $F_G$  a vodorovná síla  $F_S$ , závislá na velikosti zpomalení, tedy na intenzitě brzdění. Tíhová síla se přenáší na rám koloběžky přes nášlapnou plochu a vodorovná síla přes řídítka [3]. Velikost zpomalení závisí na široké škále faktorů, jako především na intenzitě brzdění, adhezi mezi pneumatikou a vozovkou, polohou a výškou těžiště, podélném sklonu vozovky, jízdnicích odporech apod. Dle [3] při brzdění jen předního kola na suché a pevné vozovce vzniká maximální zpomalení  $b_{max} = 8\text{ms}^{-2}$ . Na koloběžku potom budou působit síly [3]:

Tíhová síla:

$$F_G = mg \text{ [N]}$$

$$F_G = 100 \cdot 9.78 \cong 1000 \text{ N}$$

Vodorovná síla:

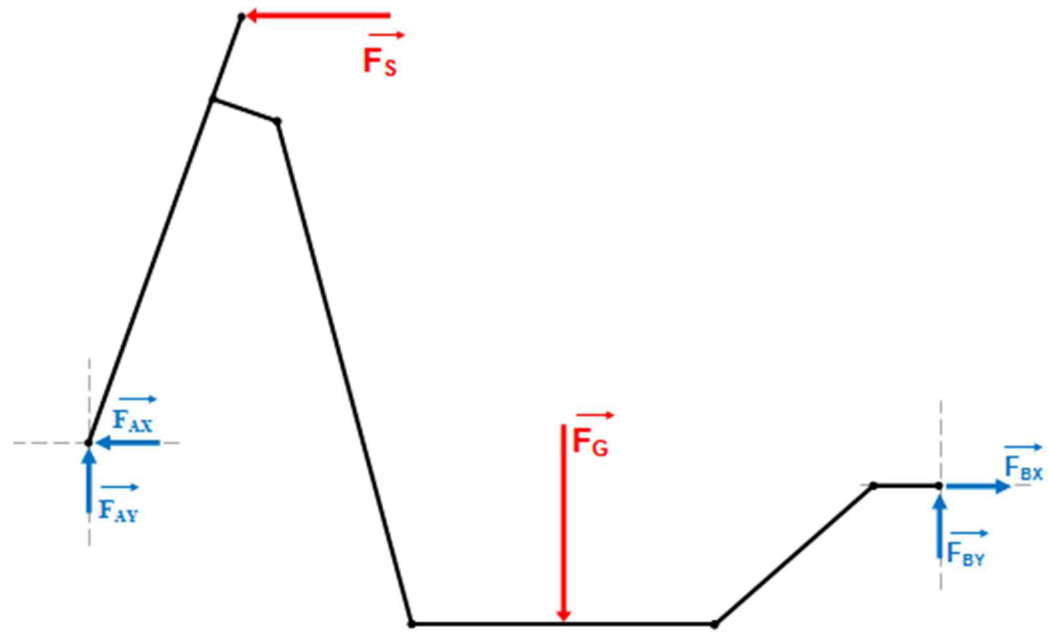
$$F_S = mb_{max} \text{ [N]} \quad 4.7$$

$$F_S = 100 \cdot 8 = 800 \text{ N}$$

kde:

$m$  [kg]                      hmotnost jezdce

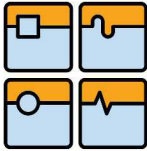
Úplné uvolnění tělesa:



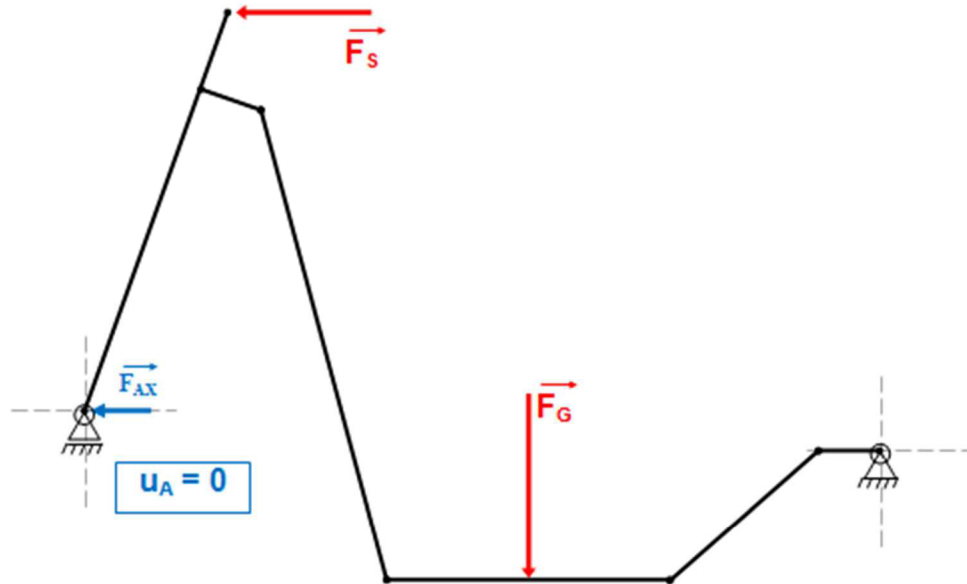
Obr. 43 – Uvolněné těleso - brzdění

**Statický rozbor:**

- $\vartheta = 3$                       počet použitelných podmínek (obecná rovinná soustava)
- $\mu = 4$                       počet neznámých parametrů ( $F_{AY}, F_{AX}, F_{BY}, F_{BX}$ )
- $s = \mu - \vartheta = 1$               úloha je 1x staticky neurčitá:

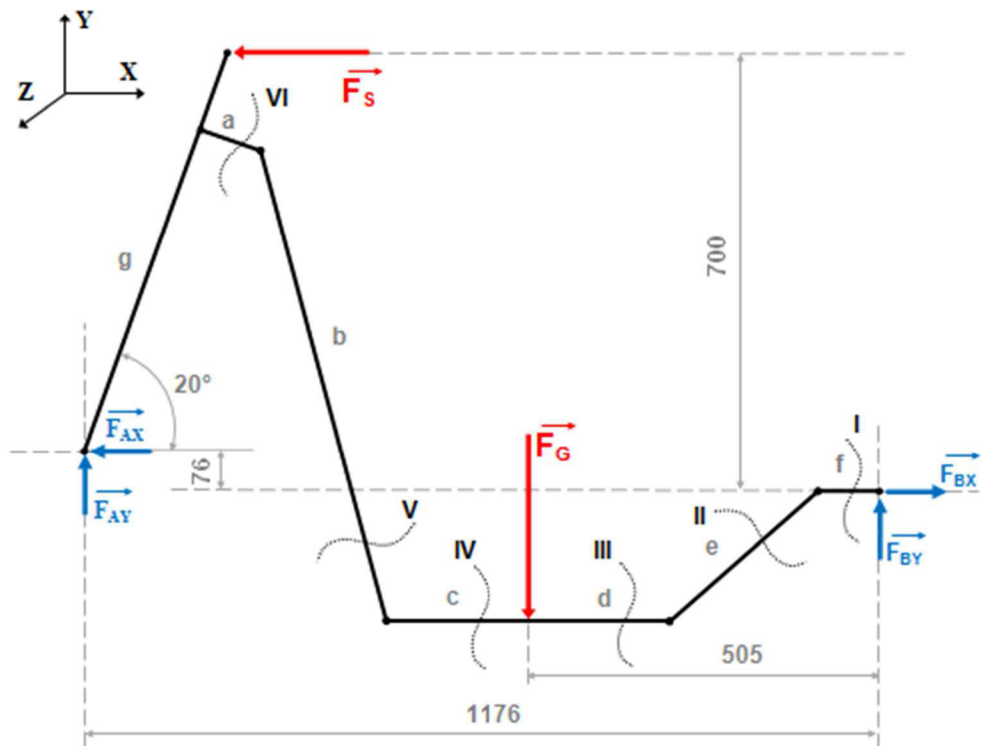


- provedeme částečné uvolnění a zavedeme deformační podmínku:



Obr. 44 - Částečné uvolnění - brzdění

Z podmínek statické rovnováhy vyjádříme stykové síly jako podmínky SR funkce  $F_{AX}$ :



Obr. 45 - Statický rozbor - brzdění

$$\sum F_x = 0: F_{BX} - F_{AX} - F_s = 0$$

$$\sum F_y = 0: F_{AY} + F_{BY} - F_G = 0$$



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

$$\sum M_B = 0: F_G 0.505 - F_{AY} 1.176 + F_{AX} 0.076 + F_S 0.700 = 0$$

Vyjádření sil  $F_{BX}$  a  $F_{BY}$  jako funkci síly  $F_{AX}$ :

$$F_{BX} = F_{AX} + F_S; \quad F_{BY} = F_G - F_{AY};$$

$$F_{AY} = \frac{F_G 0.505 + F_{AX} 0.076 + F_S 0.700}{1.176}$$

Analogickým postupem jako v prvním případě zjistíme velikost síly  $F_{AX}$ . Postup u zjištění VVÚ a u vyjádření deformační podmínky a výpočtu stykových sil je naprosto stejný, jenom velikost vnějšího momentu bude rovna nule ( $M_K = 0$ ).

Za použití výše uvedeného dostaneme velikost síly  $F_{AX}$ :

$$F_{AX} = \underline{\underline{-1059 \text{ N}}}$$

Nyní provedeme zpětné dosazení zjištěné síly  $F_{AX}$  a vnější zatížení  $F_S$  a  $F_G$  do podmínek statické rovnováhy a budeme řešit soustavu rovnic (viz obrázek 45):

$$F_{BX} - F_{AX} - F_S = 0$$

$$F_{AY} + F_{BY} - F_G = 0$$

$$F_G 0.505 - F_{AY} 1.176 + F_{AX} 0.076 + F_S 0.700 = 0$$

Výsledná velikost stykových sil potom bude:

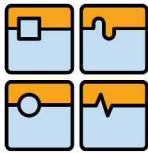
$$F_{BX} = -1859 \text{ N}$$

$$F_{AY} = 836 \text{ N}$$

$$F_{BY} = 164 \text{ N}$$

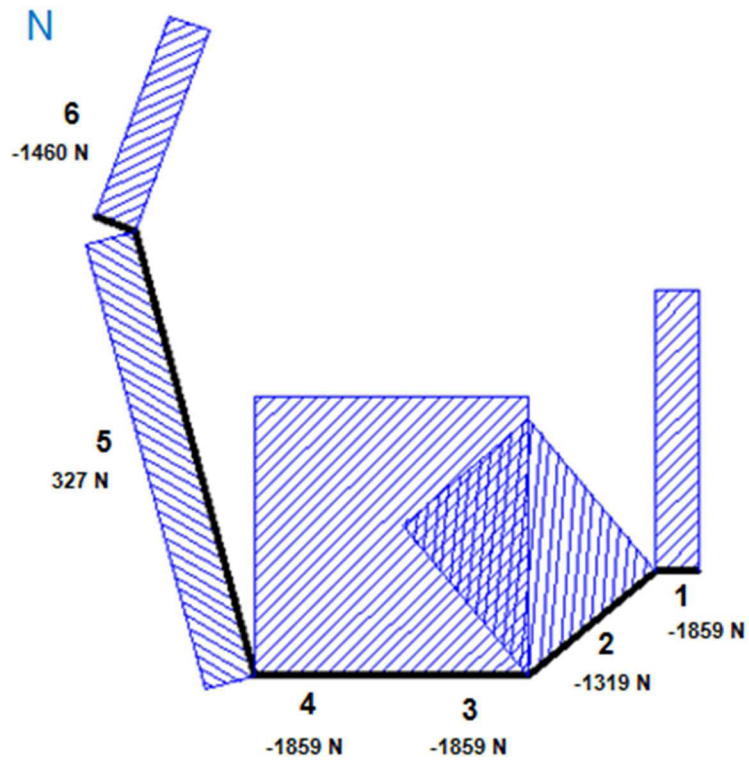
Vyčíslení průběhu VVÚ potom bude:

$N_1 = -1859 \text{ N}$ $T_1 = -164 \text{ N}$ $Mo_1(0) = 0 \text{ Nm}$ $Mo_1(0.070) = 11 \text{ Nm}$	$N_2 = -1319 \text{ N}$ $T_2 = -1320 \text{ N}$ $Mo_2(0) = 11 \text{ Nm}$ $Mo_2(0.272) = 370 \text{ Nm}$	$N_3 = -1859 \text{ N}$ $T_3 = -164 \text{ N}$ $Mo_3(0) = 371 \text{ Nm}$ $Mo_3(0.225) = 408 \text{ Nm}$
$N_4 = -1859 \text{ N}$ $T_4 = 836 \text{ N}$ $Mo_4(0) = 408 \text{ Nm}$ $Mo_4(0.225) = 220 \text{ Nm}$	$N_5 = 327 \text{ N}$ $T_5 = 2012 \text{ N}$ $Mo_5(0) = 255 \text{ Nm}$ $Mo_5(0.760) = -1274 \text{ Nm}$	$N_6 = -1460 \text{ N}$ $T_6 = 1422 \text{ N}$ $Mo_6(0) = -1308 \text{ Nm}$ $Mo_6(0.070) = -1408 \text{ Nm}$



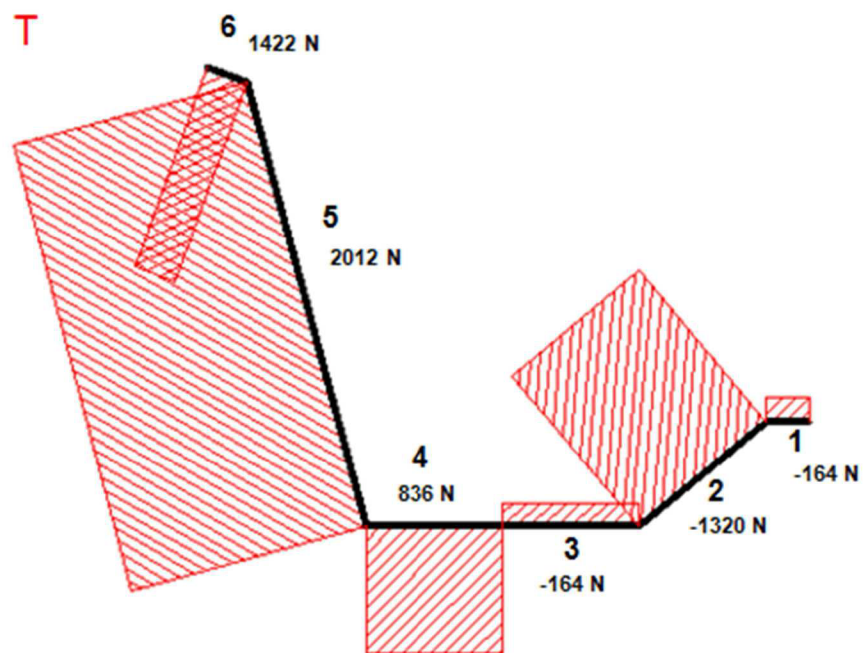
**Grafické znázornění průběhu VVÚ:**

Normálová síla N:



Obr. 46 - Grafické znázornění VVÚ – N

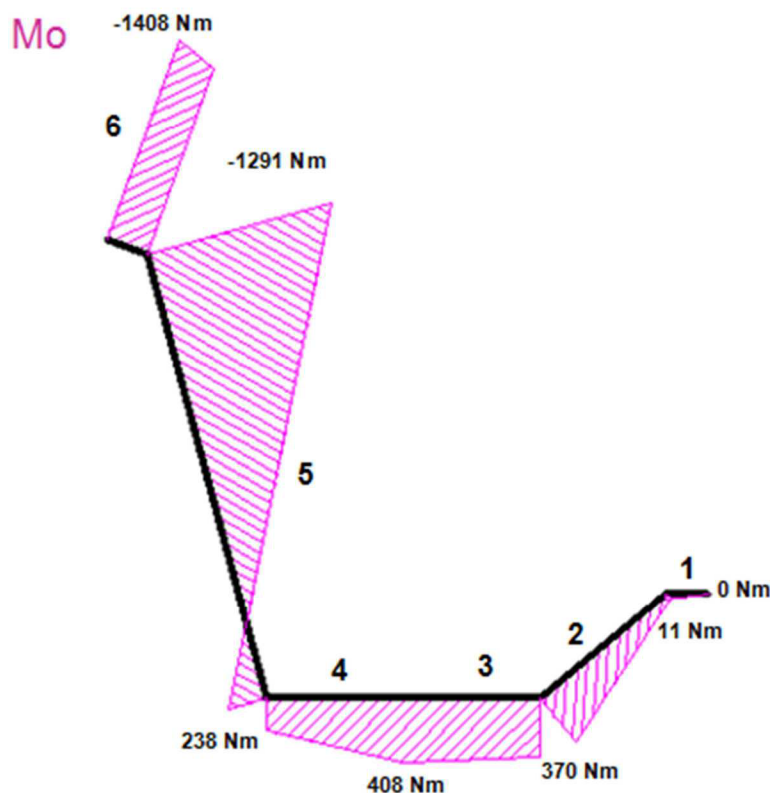
Posouvající síla T:



Obr. 47 - Grafické znázornění VVÚ - T



Ohybový moment:



Obr. 48 - Grafické zobrazení VVÚ - Mo

### Kontrola mezního stavu pružnosti:

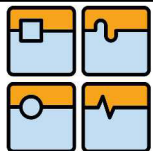
Z výsledku rozboru VVÚ můžeme usoudit, že rám bude nejvíce namáhán v místě, kde se napojuje na vidlici předního kola. Z vyčíslených hodnot velikosti ohybového momentu vypočítáme velikost napětí a následně i bezpečnost k MSP. Nebezpečný průřez, který budeme vyšetřovat, se nachází v okolí přechodu tělesa 5 a 6 ( $M_o = 1291 \text{ Nm}$ ). Postup je stejný jako v případě předchozího rozboru. Průhyb v místě působení síly  $F_G$  nebudeme uvažovat, neboť velikost ohybového momentu je v tomto místě nižší než minule.

### Vyhodnocení:

Tab. 8 - Výsledek analytické části 2

Č.	ROZMĚR [mm]	MATERIÁL	MEZ KLUZU [MPa]	NAPĚTÍ [MPa]	BEZPEČNOST K MSP [-]
1	20 x 2,5 (2)	11353.1	235	1202	0,20
2	20 x 5,0 (2)			877	0,25
3	25 x 3,0 (2)			713	0,33
4	35 x 5,0 (2)			207	1,13

Pozn.: Vnější rozměr x tloušťka stěny, číslo v závorce udává, že konstrukce rámu je tvořena dvěma trubkami. Materiál 11353.1 – nelegovaná konstrukční ocel, normalizačně žíhaná, výborná svařitelnost a obrobitelnost.



Analytickým rozбором jsme zjistili, že vhodným profilem pro konstrukci rámu je dvojitý trubkový průřez o minimálních rozměrech 35 x 5,0 mm, vyrobený z konstrukční nelegované oceli. Tento výsledek musíme ovšem brát s rezervou, neboť výpočet napětí v místě největšího ohybového momentu je nepřesný. Na skutečné konstrukci rámu se v tomto místě předpokládá zvýšené napětí a je tedy dodatečně vyztuženo. Tím se ale významně změní příčný průřez namáhaného profilu a tím i jeho modul v ohybu.

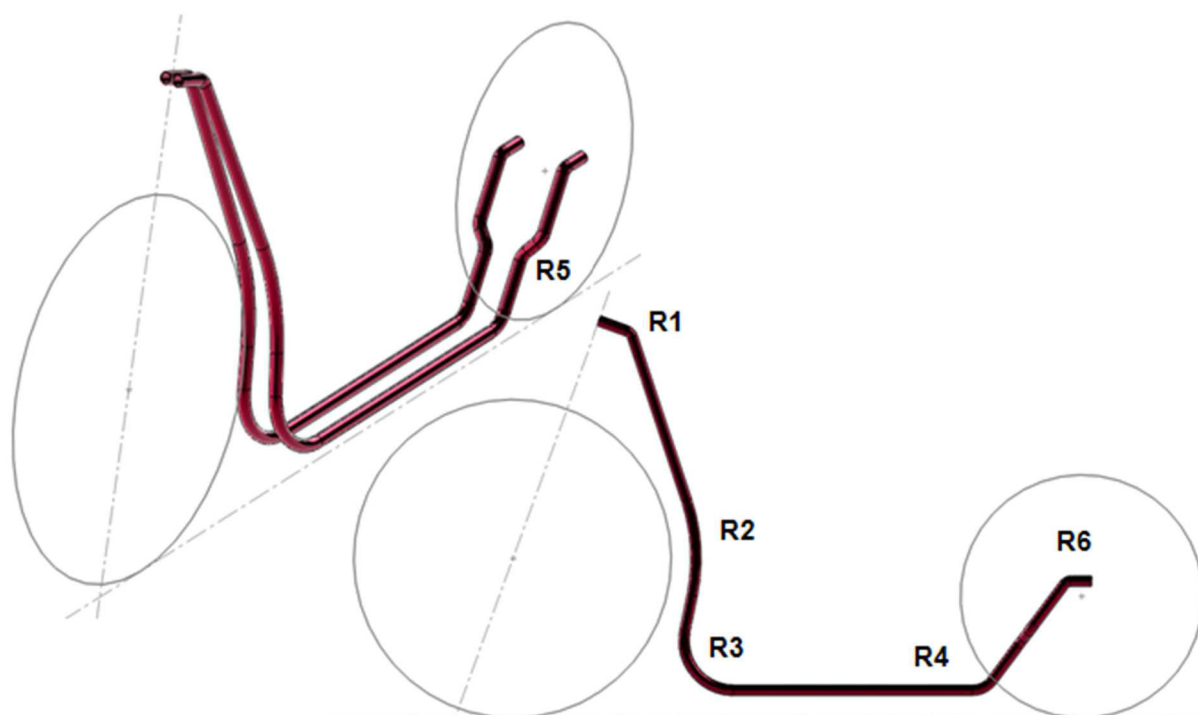
Skutečné napětí bude tedy významně nižší a bezpečnost MSP bude u menších profilů vyšší. Z tohoto důvodu bude při dalším návrhovém postupu rámu brán jako výchozí profil č. 1 a až s pomocí numerického modelování zoptimalizujeme velikost výsledného průřezu.

#### 4.5 Tvorba 3D modelu - designový a konstrukční návrh

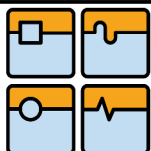
Návrh geometrie rámu vychází z následujících požadavků:

- trubkový profil 20 x 2,5 mm
- rozvor kol minimálně 1150
- vnější velikost předního kola 642 mm a zadního 490 mm
- šíře rámu v místě umístění elektromotoru minimálně 110 mm
- výška hlavové trubky minimálně 800 mm
- sklon vidlice 20°
- minimální délka nášlapu 400 mm a světlá výška 50 mm

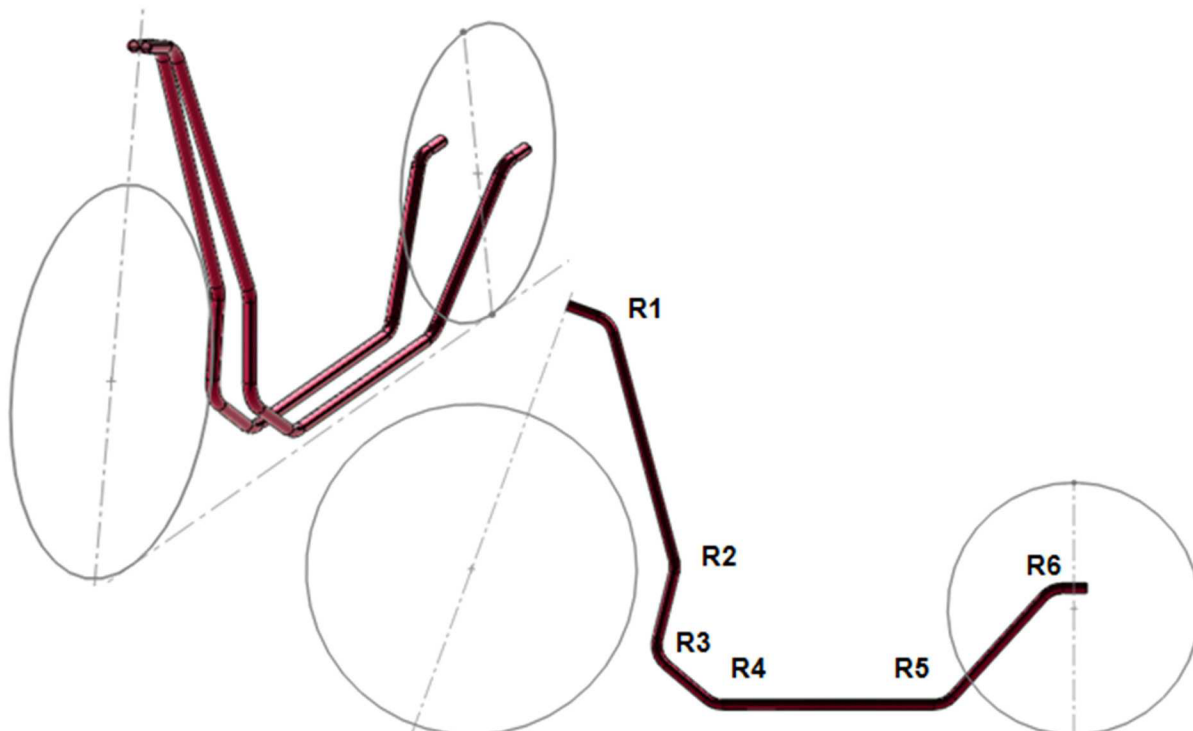
Na základě těchto parametrů byl navržen první tvar rámu:



Obr. 49 - Návrh geometrie rámu



Tato geometrie splňuje veškeré požadavky. Navíc se nejedná o dělenou konstrukci, takže není nutné svařovat stupátkovou část s přední částí tak, jak to bývá u těchto koloběžek běžné. Ovšem z výrobního hlediska byl tento tvar shledán (v rámci kusové výroby) náročný a tedy i nákladný. Z důvodu snížení výrobních nákladů se bude trubka ohýbat v prostoru na přesné CNC ohýbačce, která disponuje jedním ohýbacím nástrojem. Z toho vzniká požadavek na geometrii rámu, aby všechny ohyby měly jednotnou velikost poloměru. To současný návrh nesplňuje. Na základě výše uvedeného byl návrh přepracován:



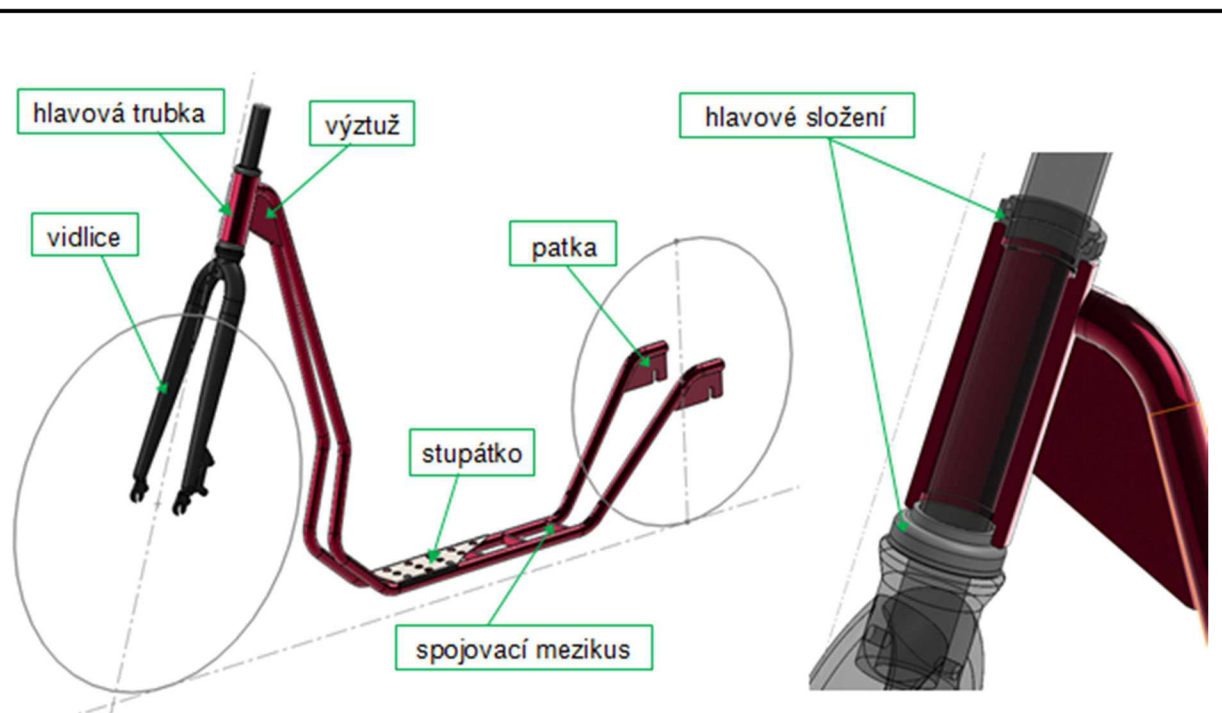
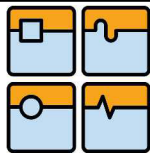
Obr. 50- Upravená geometrie rámu

Upravená geometrie je složena celkem z 12 ohybů ve dvou rovinách (R1 až R4 a druhá rovina je R5 a R6). Všechny poloměry mají jednotnou velikost 50 mm (na střed trubky), což představuje standardní velikost ohýbacího nástroje. Obrázek zobrazuje už upravenou (zkrácenou) velikost rámu (výrobní geometrie má po stranách určitý přesah z důvodu technologie ohýbání na prostorové ohýbačce).

Rám je svarově spojen ve spodní části a v místě hlavové trubky. **Spojovací mezikusy** jsou vypáleny z plechu o tl. 5 mm, materiálu 1.0984. Jedná se o jakostní ocel s nízkým obsahem uhlíku, která se hlavně používá k tváření za studena (pásky, plechy, apod..). Tato ocel je vhodná ke svařování, navíc je dostupná a levná. Dalšími výpalky jsou výztuž **hlavové trubky a patky** pro zavěšení zadního kola a uchycení elektromotoru.

Místo v rámu pro uložení hlavového složení (**hlavová trubka**) je vyrobeno z nelegované konstrukční oceli, materiál 1.0715. Polotovarem je kruhová tyč, tažena za studena Ø45. Polotovár bude obráběn na soustruhu vrtáním, případně následně vyvrtáváním vnitřní průchozí válcové plochy a obrobením dosedacích ploch pro uložení hlavového složení.





Obr. 51 - Rámové komponenty

**Stupátko** je vyrobeno z nerezového plechu, tl. 1 mm, vysekáno na děrovacím lisu a hrany zahnuty na ohraňovacím lisu. K rámu je připevněno trhacími nýty. **Hlavové složení** je typu AHEAD 28.6mm, do rámu koloběžky je uloženo zalisováním. Horní i spodní ložisko je kuličkové, zapouzdřené. Materiál je kombinace hliníku a oceli. **Vidlice** je pevná MTB Force Disc 26", vyrobena z hliníkové slitiny AL 7005, určená pro uložení AHEAD a s uchycením na kotoučovou brzdu.

#### 4.6 Pevnostní simulace metodou konečných prvků

Pro numerickou metodu zjištění průběhu napětí a velikosti deformace bude použit software ANSYS Mechanical APDL a vývojové prostředí WorkBench. Budeme uvažovat stejné případy vnějšího zatížení jako v analytické části. Simulaci začneme s použitím trubkového profilu  $\text{Ø}20 \times 2,5 \text{ mm}$  a na základě výsledků bude provedena optimalizace. Nejprve budeme uvažovat případ současného zatížení od tíhové síly  $F_G$  a momentu  $M_K$ . Přední vidlice je součástí simulace, ale její materiálové charakteristiky jsou v softwaru nastaveny tak, aby nepodléhala deformaci a pouze přenášela zatížení. Důvod tohoto řešení je ten, že vidlice je kupovaná součást, jejíž mechanické vlastnosti jsou dané a nemůžeme je ovlivnit.

Celý model je v prostoru zavazben pomocí cylindrické a obecné vazby. Tyto vazby jsou umístěny v místě zavěšení předního a zadního kola. Pro reflektování skutečného stavu byly tyto vazby nastaveny s  $1^\circ$  volnosti v tangenciálním směru u cylindrické vazby a s volností pohybu v ose X u obecné vazby (viz obrázek 52).

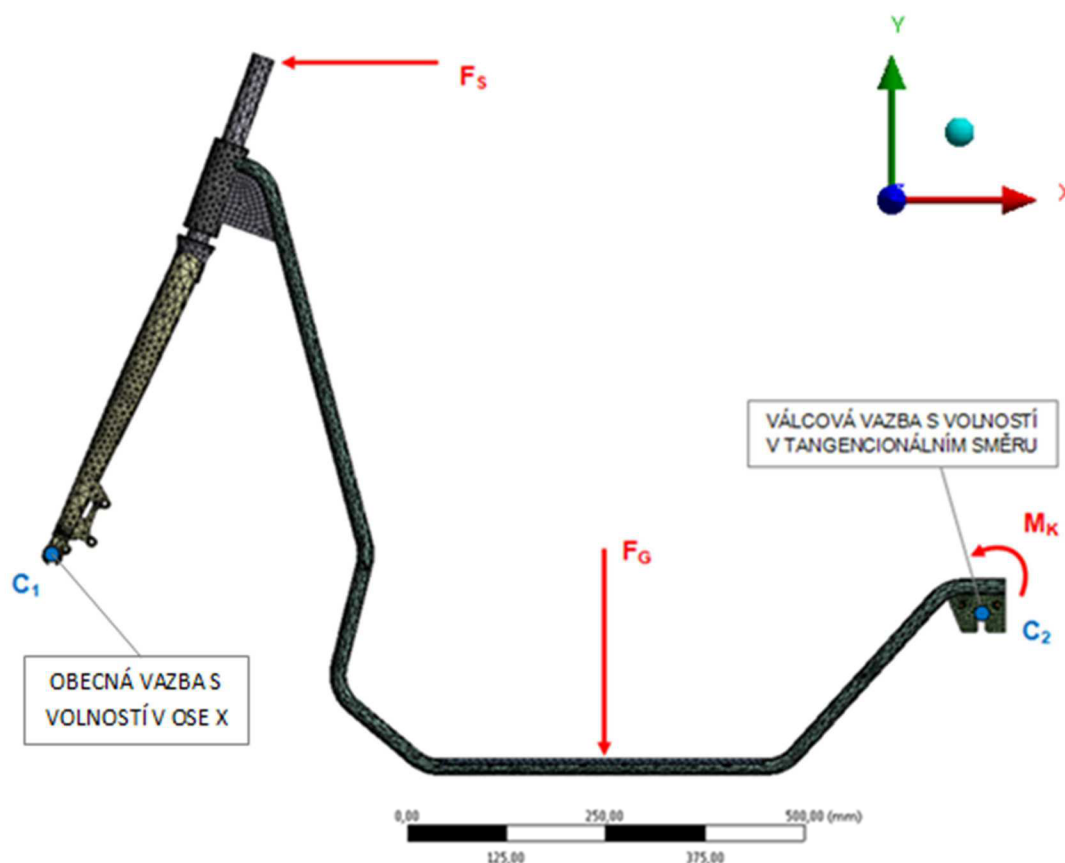
Materiálové parametry jsou:

Tab. 9 - Materiálové charakteristiky

ZNAČKA OCELI	DRUH OCELI	VÝROBEK	Rp0,2		Rm MPa
			°C	MPa	
11353.1 (1.0308)	nelegovaná ocel obvyklé jakosti	ohýbaná trubka - rám	20	235	343
S355J2	nelegovaná konstrukční ocel	hlavová trubka	20	345	510
1.0984	legovaná jakostní ocel	spojovací mezikus, patka, výztuž	20	500	550
1.4301	nerezová ocel	stupátko	20	240	430

Pro všechny ocele platí: modul pružnosti  $E=2.1 \cdot 10^{11}$  Pa a Poissonovo číslo 0,3

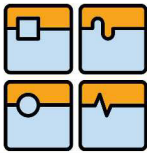
Konečná síť prvků je vytvořena metodou Free Mesh s manuálním Refinementem v předpokládaných nebezpečných místech průřezu:



Obr. 52 - Vysíťovaný model s naznačeným zatížením a vazbami

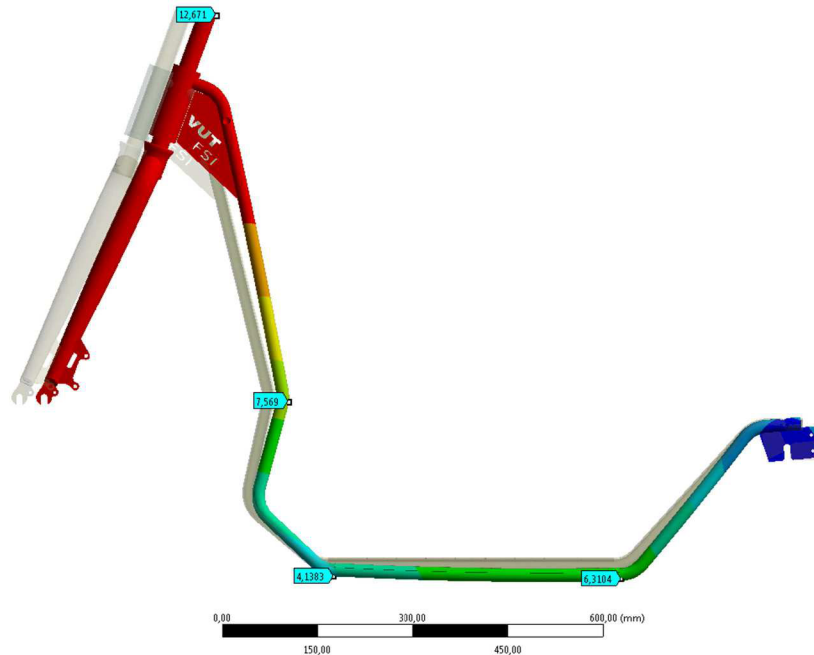
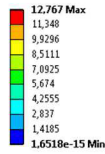
## 1. SIMULACE

V první fázi simulace uvažujeme pouze současné zatížení od tíhové síly  $F_G$  a momentu motoru  $M_k$ .



### Kontrola deformace:

B: Static Structural  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 1



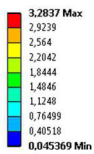
ANSYS  
R14.5

Obr. 53 - Deformace rámu, profil  $\text{Ø}20 \times 2,5$ , situace 1

Posun horní části rámu je přes 12mm, musíme tedy zvolit jiný průřez a upravit geometrii. Z výsledků analytické části použijeme profil  $\text{Ø}25 \times 3,0$  mm, a upravíme konstrukci (vyztužení nášlapu). Znovu provedeme simulaci:

### Upravená geometrie:

B: Static Structural  
Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 1

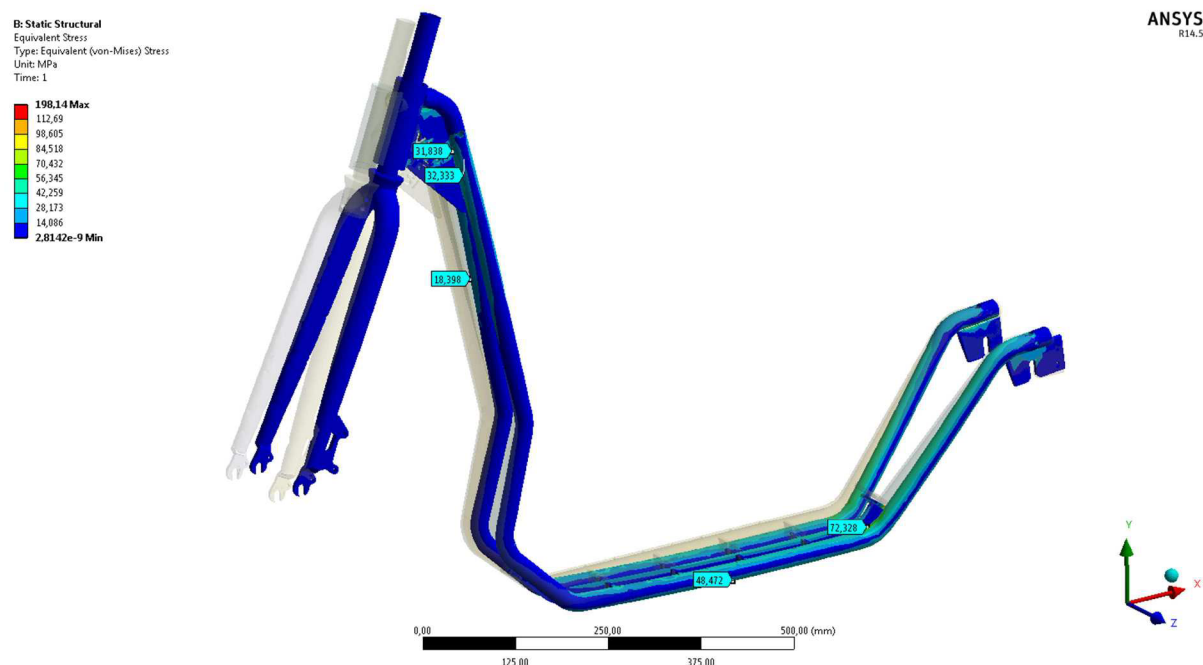


ANSYS  
R14.5

Obr. 54 - Deformace rámu, profil  $\text{Ø}25 \times 3,0$ , situace 1

Při maximálním zatížení se světlá výška nášlapu zmenší o cca 2 mm. To je vzhledem k výšce v nezatíženém stavu přijatelná hodnota. Navíc bude zachována

přijatelná váha, zvětšení tloušťky stěny nebo zesílení konstrukce by vedlo k zbytečnému nárůstu hmotnosti. Nyní se zaměříme na zjištění intenzity napětí v různých místech průřezu:



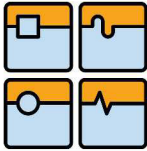
Obr. 55 – Intenzita napětí – situace 1

Maximální velikost napětí vyšla v místech dotyku zapouzdřených ložisek, která spojují vidlici a rám koloběžky. Na základě tohoto výsledku zvolíme při nákupu hlavového složení válečková ložiska.

Tab. 10 - Výsledky FEM analýza - rozjezd

místo	materiál	velikost napětí [MPa]
rám	11353.1	72
rám	11353.1	48
rám	11353.1	32

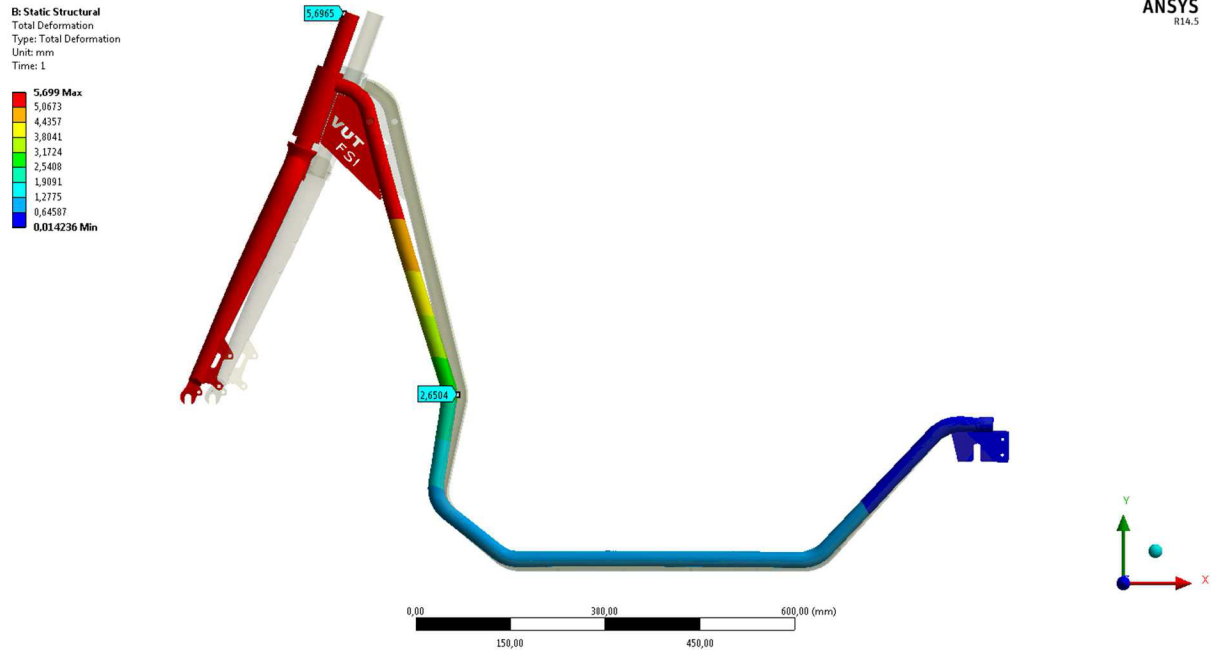
Maximální dovolené napětí vzhledem k mezi kluzu je u použitého materiálu trubky 235 MPa. Rám koloběžky bude ale při pohybu zatěžován míjivě. Podle [6] se při míjivém zatížení násobí maximální dovolené napětí součinitelem  $c_{II}$ , který je pro tuto ocel 0,85. Výsledné maximální dovolené napětí je pak cca 200MPa. Při statickém zatížení nám v rámu vyšlo maximální napětí 72 MPa. Mělo by se tedy jednat o dostatečně nízkou hodnotu.



## 2. SIMULACE

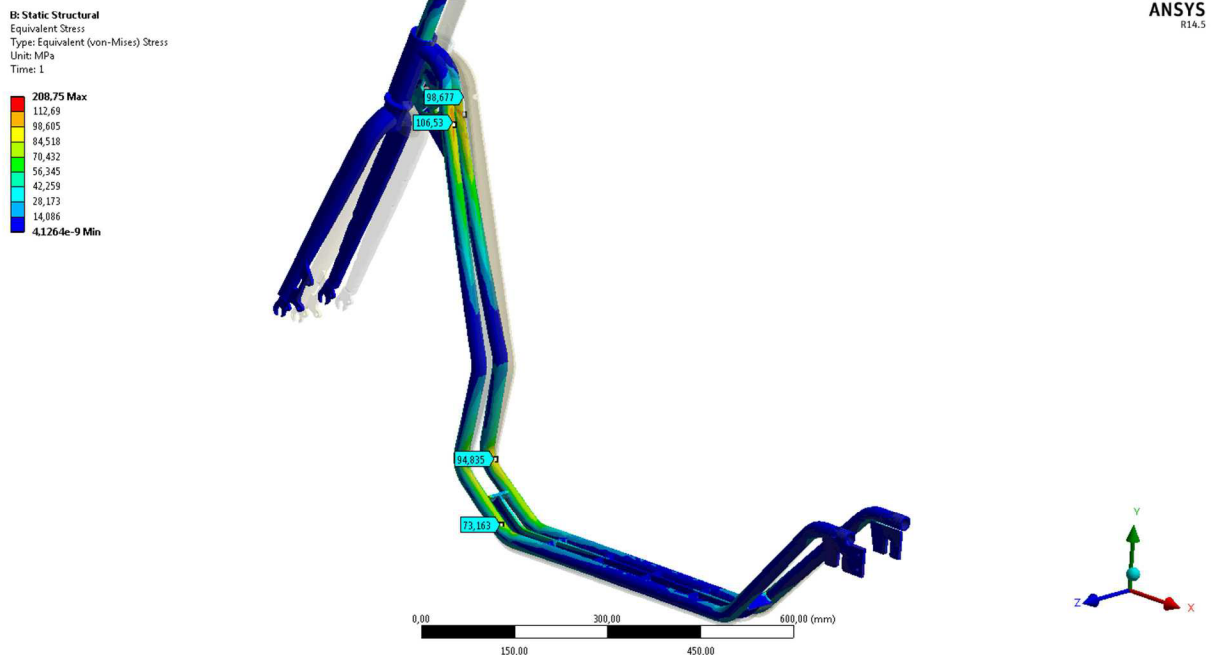
Další simulací je zatížení rámu při prudkém brzdění. Působící síly nyní jsou tíhová síla  $F_G$  a vodorovná síla  $F_S$  (viz obrázek 52).

### Kontrola deformace:



Obr. 56 - Deformace rámu, zvětšená 10x, situace 1

### Intenzita napětí:



Obr. 57 – Intenzita napětí – situace 2

I v tomto případě vyšlo zvýšené namáhání v místech hlavového uložení. Výsledky jsou zaneseny do tabulky č.11.



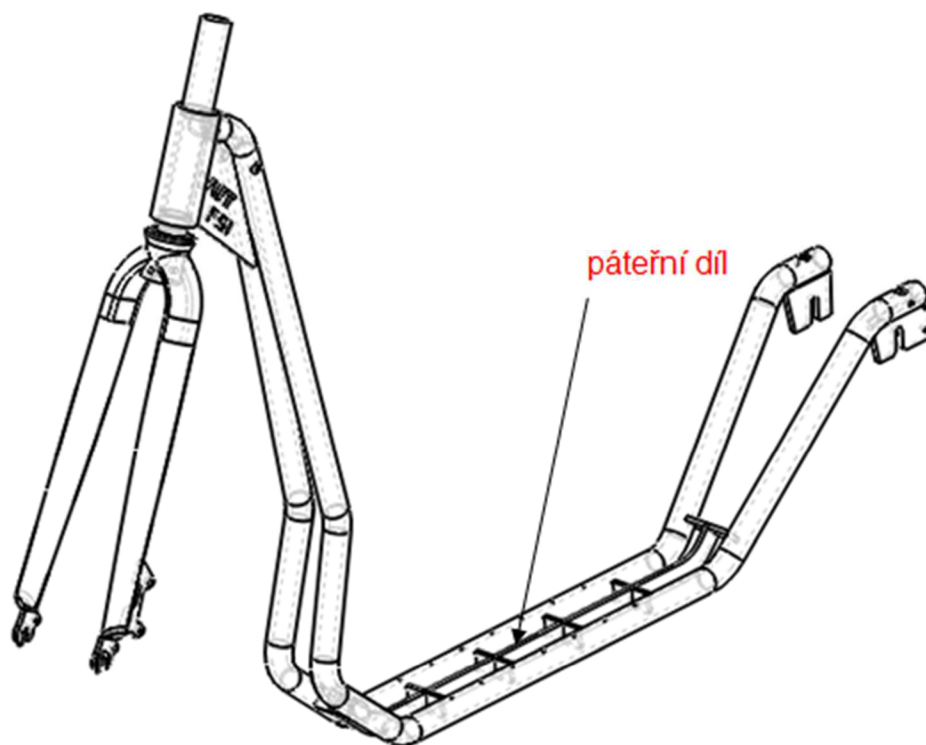
Tab. 11 - Výsledky FEM analýza - brzdění

místo	materiál	velikost napětí [MPa]
rám	11353.1	107
rám	11353.1	99
rám	11353.1	73

Výsledek druhé části ukázal nejvyšší napětí v horní části rámu. Tato část je vyztužena dílem, který spojuje rám s hlavovou trubicou. Výpočet počítal s abnormálním zpomalením  $8\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ . V ideálních podmínkách při běžném provozu dosahuje největší zpomalení na horském kole velikosti cca  $6\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ .

#### 4.7 Hotový návrh rámu koloběžky

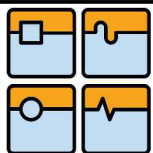
Navrhnutí jsme vhodnou geometrii rámu a pomocí analytických postupů a numerického ověření jsme zjistili nejmenší možný průměr kruhové trubky, z které může být rám vyroben. Použitím „páteřního dílu“ jsme za nízkého zvýšení hmotnosti přidali nášlapu i celé konstrukci na větší tuhosti.



Obr. 58 - Hotový návrh rámu koloběžky

#### Charakteristické prvky:

- konstrukce je tvořena dvojicí ohýbaných trubek  $\text{Ø}25\times 3,0\text{ mm}$  (ocel 11353.1)
- rozvor kol je **1210 mm** (min. požadavek 1150)
- délka nášlapu **450 mm** (min. požadavek 400) a světlá výška **50 mm**
- výška hlavové trubky **840 mm** (min. požadavek 800)
- hmotnost **8000g** (zobrazení na obrázku 58, bez vidlice)



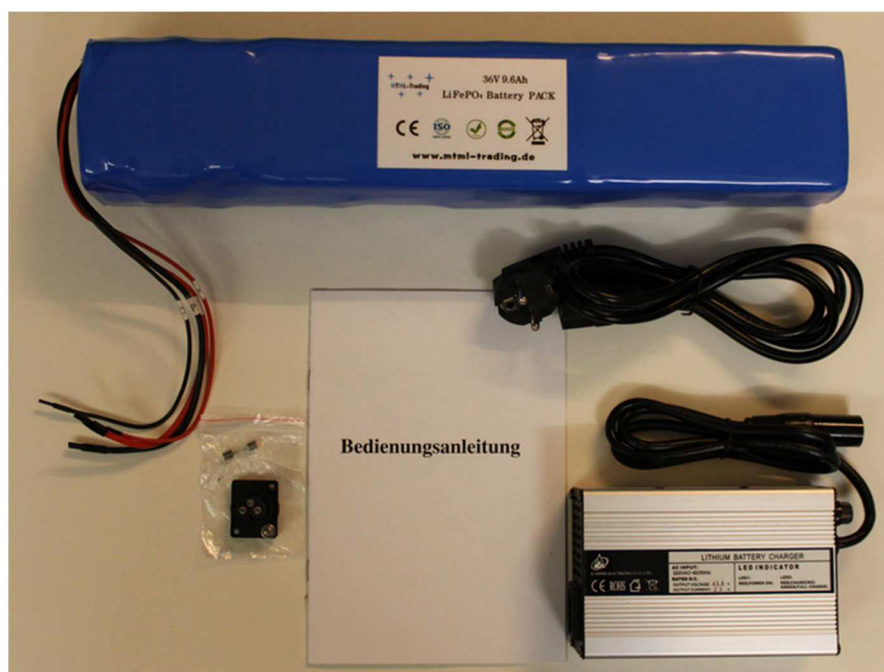
## 5 Akumulátor

Před samotným návrhem nosiče, ve kterém bude umístěn akumulátor a řídicí jednotka, je nejdříve nutné zjistit, jaké jsou rozměry baterie, popřípadě obalu ve kterém je uložena. Pro naši konstrukci potřebujeme baterii s nominálním napětím 36V a kapacitou minimálně 10 Ah, jak jsme stanovili ve výkonové části.

Na základě průzkumu trhu jsme zvolili baterii od německého prodejce a výrobce MTML Trading GmbH [29], konkrétně uniformní typ určený pro přestavbu - Prophete LiFePO4 36V, 9,6Ah, který splňuje následující parametry:

Tab. 12 - Přehled parametrů akumulátoru

nominální napětí	36 V
napětí naprázdno	38,4 V
kapacita	> 9,6Ah
minimální napětí	30 V
nabíjecí napětí	43,8 V
maximální proudová zátěž	20 až 22 A
nabíjecí proud	až 5 A
typ článků	lithium-železo fosfátové
nabíjecí cykly do 10% poklesu kapacity	> 1500
doba nabíjení	4 hod
rozměry	65 x 85 x 410mm (v x š x d)
cena bez DPH (5/2014)	250 EUR
- baterie je vybavena vnitřním BMS obvodem	
- součástí akumulátoru je i nabíječka	



Obr. 59 - LiFePO4 bateriový balíček, 36V 9,6 Ah [29]

Tato baterie je dostatečně výkonná, důležitý parametr je maximální proudový odběr, který potřebujeme minimálně 20A. Negativem tohoto balíčku je jeho velikost a absence vnějšího obalu, který by ji chránil před poškozením.

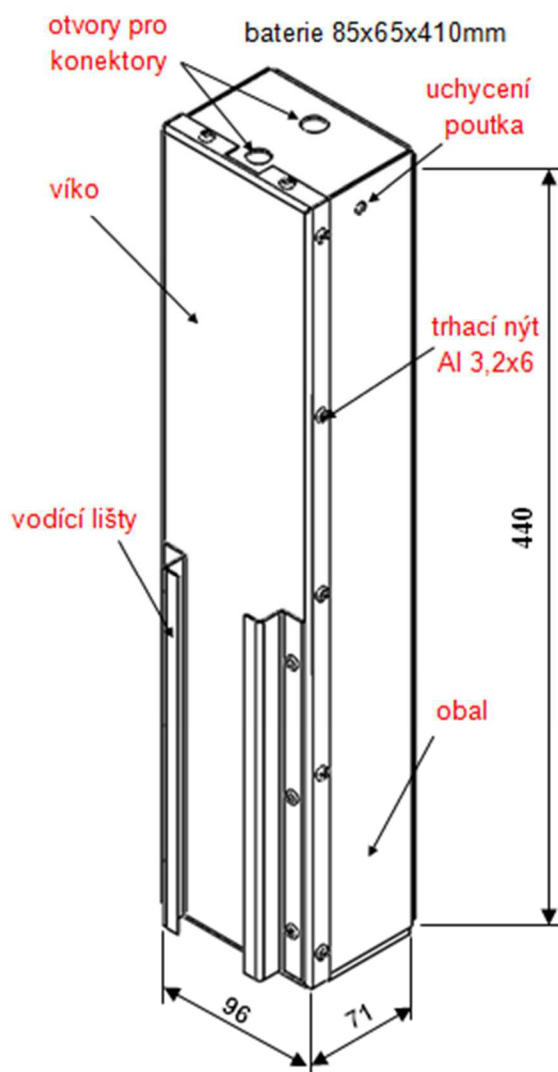
Z důvodu větší velikosti bylo zvoleno umístění baterie na nášlapu za jezdce, ve vertikální poloze. Na základě místa této instalace se navrhnul tvar a velikost obalu.

Vlastní obal je vyroben z hliníkového plechu tl. 1mm. Jednotlivé díly jsou obrobena na vysekávacím lisu a ohnuty do požadovaných tvarů. Obal je tvořen spodní částí a víkem, na víku jsou ještě připevněny vodící lišty. Všechny díly jsou práškově lakovány na požadovaný odstín. Vnitřní strana obalu je po ohnutí zpevněna bodovými sváry. Menší otvory v místech ohybů jsou zatmeleny. Tyto dvě části jsou spojeny trhacími nýty. Mezi víkem a obalem je ještě v tenké vrstvě nanesen těsnící tmel.

Obvodová velikost obalu je oproti vnějšímu rozměru baterie větší řádově o milimetry. V místě pro konektory je potom místa více. Proto je mezi baterií a stěnou vložena blíže nespecifikovaná nehořlavá vycpávka, která tlumí nárazy a odvádí teplo.

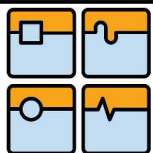
V přední části obalu jsou umístěny vodící lišty, které slouží zároveň i k uchycení obalu k rámu koloběžky. Na spodní straně je přilepena 5mm gumová destička, která brání úderům a otěru od nášlapu.

Konstrukce obalu baterie je koncipována tak, aby uživatel mohl kdykoliv, bez nástrojů, baterii odpojit a vysunout z koloběžky. K tomu ale potřebuje klíč od zámku umístěného v nosiči. Pro snadnější manipulaci bude obal vybaven látkovým nebo gumovým poutkem.



Obr. 60 - Obal na akumulátor





## 6 Nosič a řídicí jednotka

Nosič, který bude umístěn nad zadním kolem, bude obsahovat tyto komponenty:

- řídicí jednotku pro ovládání elektromotoru
- konektor pro připojení baterie
- mechanický odpojovač baterie
- menší prostor pro maličkosti (klíče od domu, doklady, telefon, atd.)

### Řídicí jednotka

Bude použita řídicí jednotka TDK 2W s LCD programovatelným displejem. Tato jednotka je součástí dodávaného elektromotoru BPM 500W, o kterém jsme pojednávali ve výkonové části. Jednotka je určena pro maximální proudovou zátěž 20 A. Po zapojení je nutné správně nakonfigurovat typ a parametry používaného akumulátoru. Jinak je jednotka, bez dalších úprav, připravena k použití.

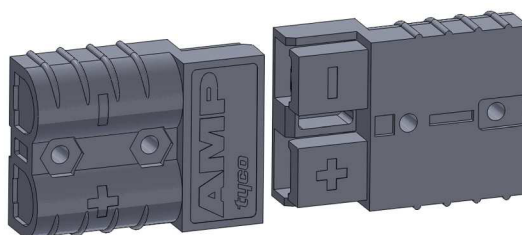
Rozměry řídicí jednotky jsou 150x80x45mm bez kabeláže a celková váha cca 400g.



Obr. 61 - Řídicí jednotka

### Konektor pro připojení baterie

Baterie bude z koloběžky vyjímací, uživatel si ji tedy může z koloběžky vypojit a nabíjet ji třeba někde v bytě. Bateriový konektor byl zvolen od společnosti TE Connectivity, typ AMP Power 50 (2 polovů). Jedná se o plastový konektor s krimpovacími nebo pájecími kontakty, určený pro přenos proudů až 50A při napětí 600V, v našem případě bude nejvyšší hodnota 20A. Výrobce nabízí ještě výkonově slabší konektory, ale ty jsou jednopólové a neumožňují mechanické ukotvení konektoru k podložce.



Obr. 62 - AMP Power Series 50, grey [31]



### Mechanický odpojovač baterie

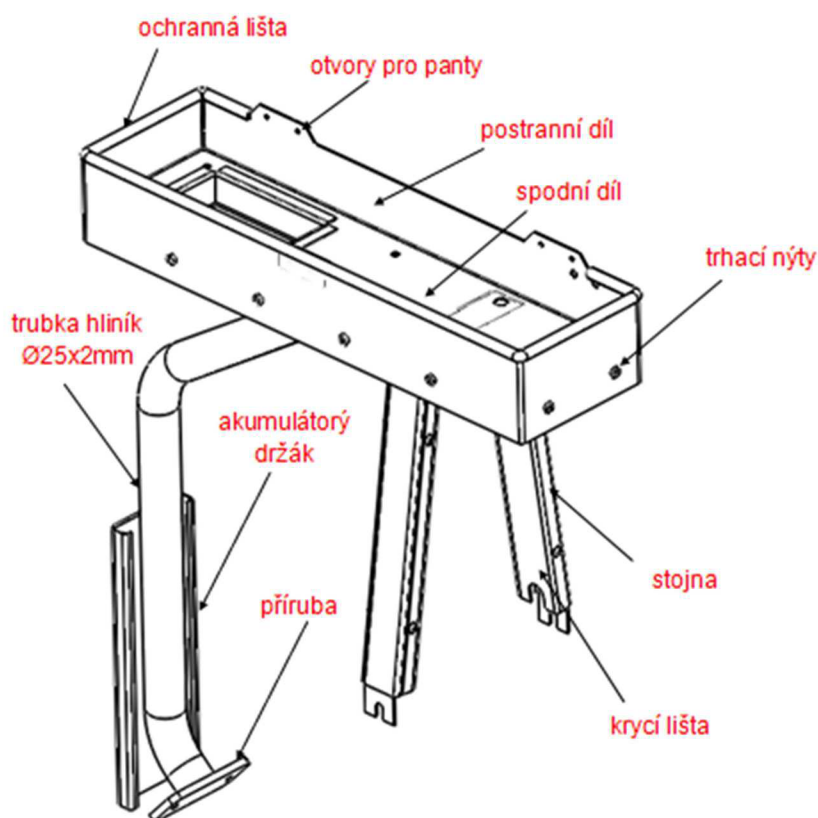
BMS (battery management systém) akumulátoru neumožňuje odpojení baterie od řídicí jednotky, například použitím spínacího zámku. Musíme tedy použít odpojovač mechanický. Ten musí být konstruovaný pro krátkodobé zatížení stejnosměrným proudem až 20A. Odpojovat se bude už bez zátěže. Na základě toho jsme zvolili vačkový dvupolohový spínač s páčkou a čelní deskou, typ S25JD od výrobce SEZ-CZ [30].



Obr. 63 - Vačkový spínač [30]

### Nosič

Při návrhu rozměrů nosiče jsme uvažovali všechny výše uvedené komponenty.

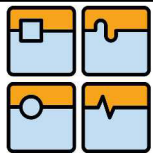


Obr. 64 - Nosič

Nosič je demontovatelná část koloběžky. Vyroben je z pozinkovaného a hliníkového plechu. Nosnou část tvoří ohýbaná trubka. Skládá se z třech hlavních částí:

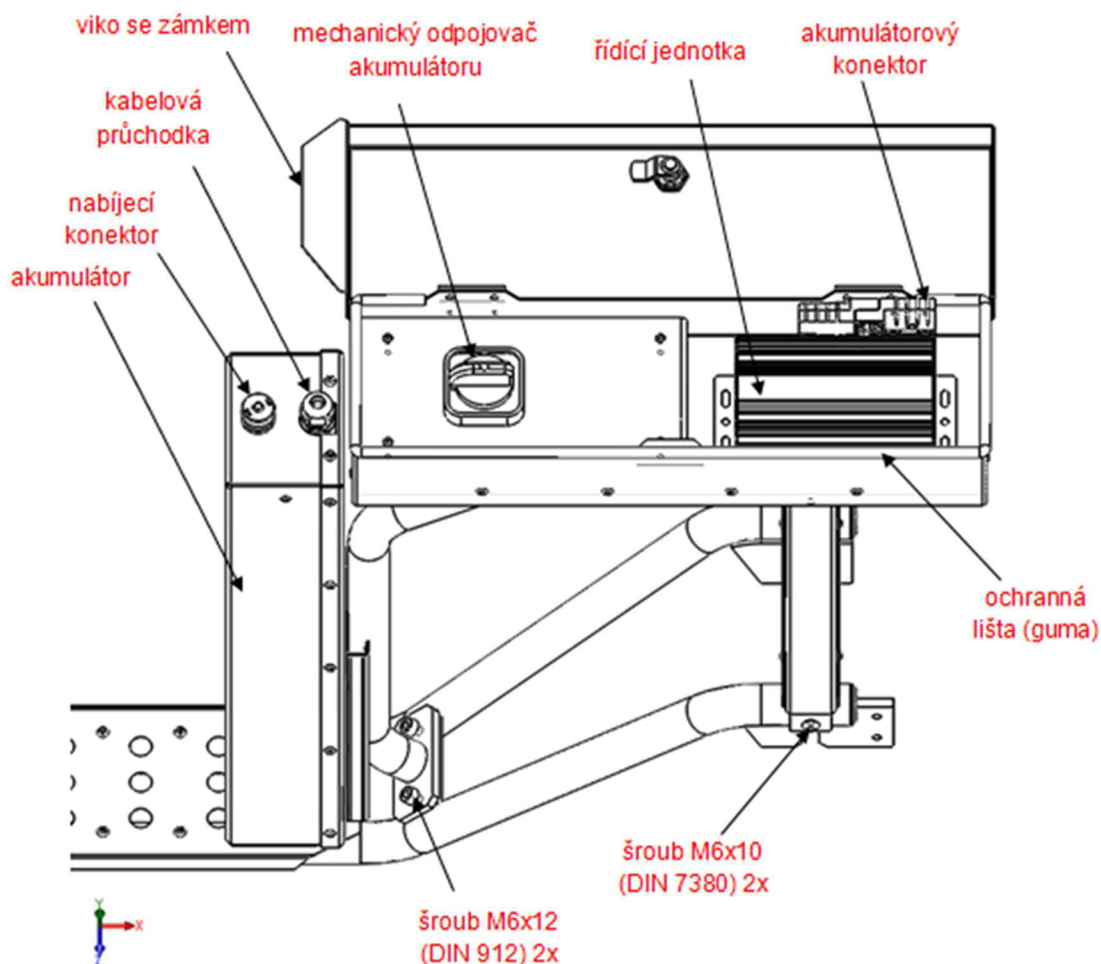
- ohýbané hliníkové trubky Ø25x2mm (AW 6060)
- nosičové části (spodní a postranní díl, hliník AW6082-T6)
- stojny (ocel 1.0226, DX51D)

Jednotlivé části jsou spojeny svarově nebo trhacími nýty. V přední části nosiče je navařen akumulátorový držák, jedná se o protikus k vodícím lištám (viz obr. 60), a příruba pro uchycení k rámu koloběžky. Spodní díl je nýtově spojen se stojnou, hliníkovou trubkou a postranním dílem. Vnitřní prostor stojny je přizpůsoben pro



vedení kabeláže od elektromotoru a ovládací jednotky z řídítek. Na stojnu je dále přišroubována krycí lišta. Každá část nosiče je práškově lakována.

Pohled na umístěný držák na rámu koloběžky:



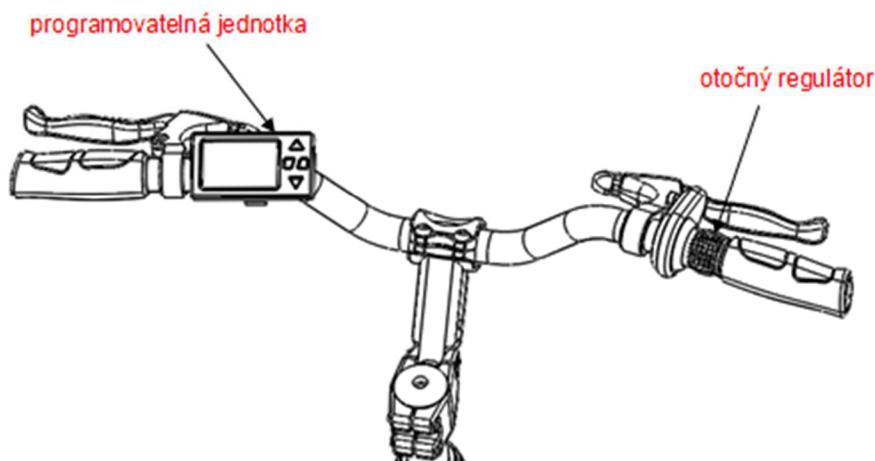
Obr. 65 - Nosič s komponenty

Jednotlivé součásti jsou v nosiči připevněny pomocí lisovacích elementů (sloupků nebo matic s vnitřním závitem) a v místech, kde není zalisování možné, bude použito maticových nýtů. U nerozebíratelných spojů bude zvoleno i nýtování. Na obrázku 64 je nosič vyobrazen v otevřeném stavu, ve kterém je možné, po odpojení konektoru, vyjmout akumulátor. Akumulátor nainstalujeme zpět do rámu koloběžky zasunutím do vodících drážek a opětovným připojením konektoru. Po zaklapnutí víka a zamknutí je zajištěn proti vyjmutí. Po použití koloběžky by se měl akumulátor z bezpečnostních důvodů odpojit od řídicí jednotky. Lze tak udělat ručně vytažením konektoru nebo uživatelsky přívětivěji otočením mechanického odpojovače. Vedení kabeláže akumulátoru je přes kabelovou průchodku do konektoru, dále do mechanického odpojovače a do řídicí jednotky. Celá konstrukce nosiče je k rámu připevněna imbusovými šrouby.

### 7 Programovatelná řídicí jednotka a plynový regulátor

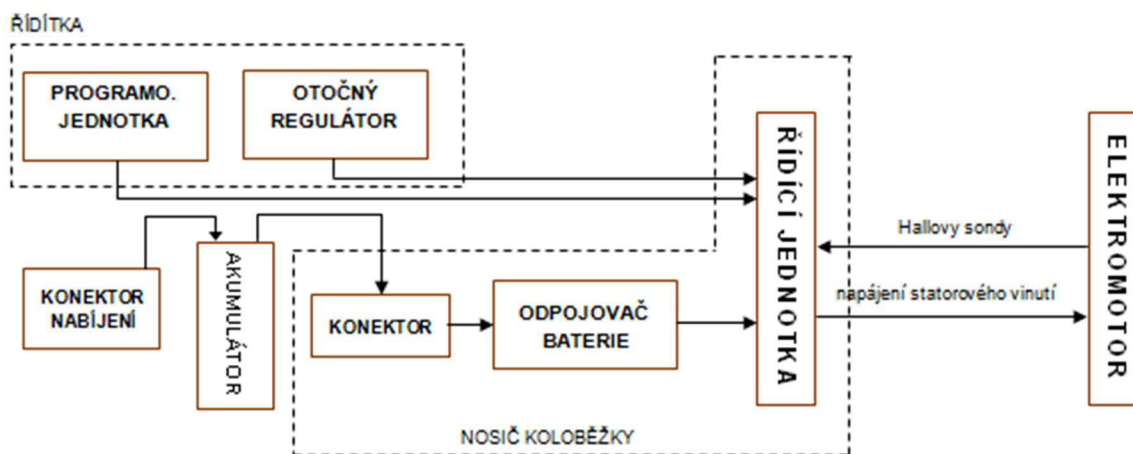
Součástí stacionární řídicí jednotky TDK-2W je i programovatelný ovladač s LCD displejem umístěným na řídicích. Tato jednotka ovšem neslouží k připojení na PC a k hlubšímu programování změn řídicích parametrů. Umožňuje zobrazit jmenovitou hodnotu napětí akumulátoru a proudu řídicí jednotky. Dále umožňuje nastavit a omezit maximální rychlost motoru (až na 60%). Při jízdě lze sledovat obvyklé parametry, jako stav nabití akumulátoru, okamžitý výkon elektromotoru, rychlost, předpokládaný možný dojezd a dobu jízdy. Důležitým ovládacím prvkem na této jednotce je vypínací tlačítko, kdy po zmáčknutí dojde k odpojení elektromotoru. Může tak za jízdy fungovat i jako nouzové vypínací stop tlačítko.

Dalším ovládacím členem elektromotoru na řídicích je otočný regulátor intenzity výkonu. V přední části obsahuje diody zobrazující stav nabití baterie. Kabeláž od prog. jednotky a regulátoru vede přes trubkovou konstrukci do nosiče, kde se napojují do stacionární řídicí jednotky.

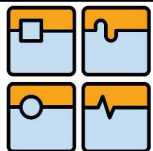


Obr. 66 - Programovatelná jednotka a regulátor na řídicích

### 8 Schéma zapojení elektro komponent



Obr. 67 - Zapojení elektro komponent



## 9 Ostatní komponenty

### Řídítka

- Force Trek AL-078, výrazně prohnutá, používají se pro krosová kola, střed řídítek standard 25,4mm, šířka 600mm a hmotnost 350g



Obr. 68 - Řídítka FORCE Trek [31]

### Představec

- BBB BHS-28 HighSix nastavitelný, kovaný představec z pevné hliníkové slitiny, s nastavitelným rozsahem úhlu sklonu, určený pro řídítka 25,4mm a hlavové složení AHEAD 1.1/8", hmotnost 260g



Obr. 69 - Představec BBB BHS 28 [32]

### Brzdy

- hydraulické kotoučové brzdy Shimano M395, určené pro uchycení POSTMOUNT a 160mm kotouče, hmotnost 310g + 150g kotouč (1pár)



Obr. 70 - Brzdy Shimano M395 [33]

### Vidlice

- MTB vidlice pevná 26" značky FORCE, vyrobena z hliníkové slitiny Al 6061, sloupek AHEAD 1.1/8", určena pro kotoučové brzdy, hmotnost 680g



Obr. 71 - Vidlice FORCE [31]

### Přední kolo

- ráfek označení FORCE BASIC DISC 559x18, 36 děr, určený pro kotoučové brzdy, hmotnost 490g [31]
- náboj Shimano Deore HB-M525, hmotnost 245g [33]

- pláště SCHWALBE Road Cruiser 26"x1,75, hmotnost 750g [34]

#### Zadní kolo

- ráfek REMERX Jumbo 406x21, 36 děr, určený pro kotoučové brzdy, hmotnost 480g [35]
- pláště SCHWALBE Road Cruiser 20"x1,75, hmotnost 560g

#### Ostatní komponenty

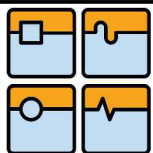
- gumová rukojeť, popřípadě přední a zadní světlo, reflexní prvky, cyklo láhev na vodu

### 10 Ekonomické zhodnocení

#### Seznam nakupovaných komponent:

Tab. 13 - Seznam nakupovaných komponent

	CENA za 1 ks [Kč bez DPH]	HMOTNOST [g]
<b>kupované komponenty cyklo</b>		
řídítka FORCE	157	350
představec BBB	520	260
brzdy SHIMANO	1.017	620
kotouče SHIMANO	412	300
vidlice FORCE	736	680
přední kolo komplet (ráfek, duše, plášť, náboj, výplet)	1.231	1.580
zadní kolo komplet (ráfek, duše, plášť, výplet)	736	1.210
ostatní (gumová rukojeť)	124	50
<b>mezisoučet</b>	<b>4.933</b>	<b>5.050</b>
<b>kupované komponenty elektro</b>		
36V/500W elektromotor, včetně řídicí jednotky, programovatelné jednotky a otočného akcelerometru [36]	5.331	3.300
baterie LiFePO4 36V/10Ah vč. nabíječky a příslušenství [29]	7.603	3.400
odpojovač baterie	250	-
bateriový konektor	125	-
nabíjecí konektor a elektropříslušenství	500	-
<b>mezisoučet</b>	<b>13.809</b>	<b>6.700</b>



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

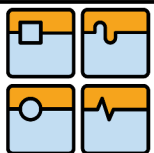
## Podrobný výpis výroby:

Tab. 14 - Výpis výroby a materiálu

	MJ	počet MJ	CENA [Kč bez DPH]	HMOTNOST [g]
<b>materiál</b>				
trubka přesná Ø25x3,0mm, ocel 11353.1	bm	4	320	-
trubka Ø25x2,0mm, hliník AW6060	bm	1	70	-
plech černý 5x1000x2000 (SM500)	m2	0.5	420	-
plech Al tvrzený 1x1000x2000 (AW6082-T6)	m2	2	450	-
plech pozink 1,3x1000x2000 (DX51+Z275)	m2	0.5	140	-
plech nerez 1x1000x2000 (1.4301)	m2	0.25	180	-
tažená ocel kruhová Ø25	m	0.2	70	-
ostatní (spojovací materiál, apod)	ks	1	500	-
<b>mezisoučet</b>			<b>2.150</b>	-
<b>výroba / práce</b>				
vypalování, vysekávání dílů z plechu, soustružení hlavové trubky (kooperace)	ks	1	1.500	-
ohýbání trubkové konstrukce (kooperace)	ks	1	3.500	-
práškové lakování dle odstínu RAL	ks	1	500	-
výroba + kompletace	ks	1	1.500	-
- rám	-	-	-	8.000
- držák s nosičem a víkem	-	-	-	1.200
- bateriový kryt	-	-	-	650
<b>mezisoučet</b>			<b>7.000</b>	<b>9.850</b>

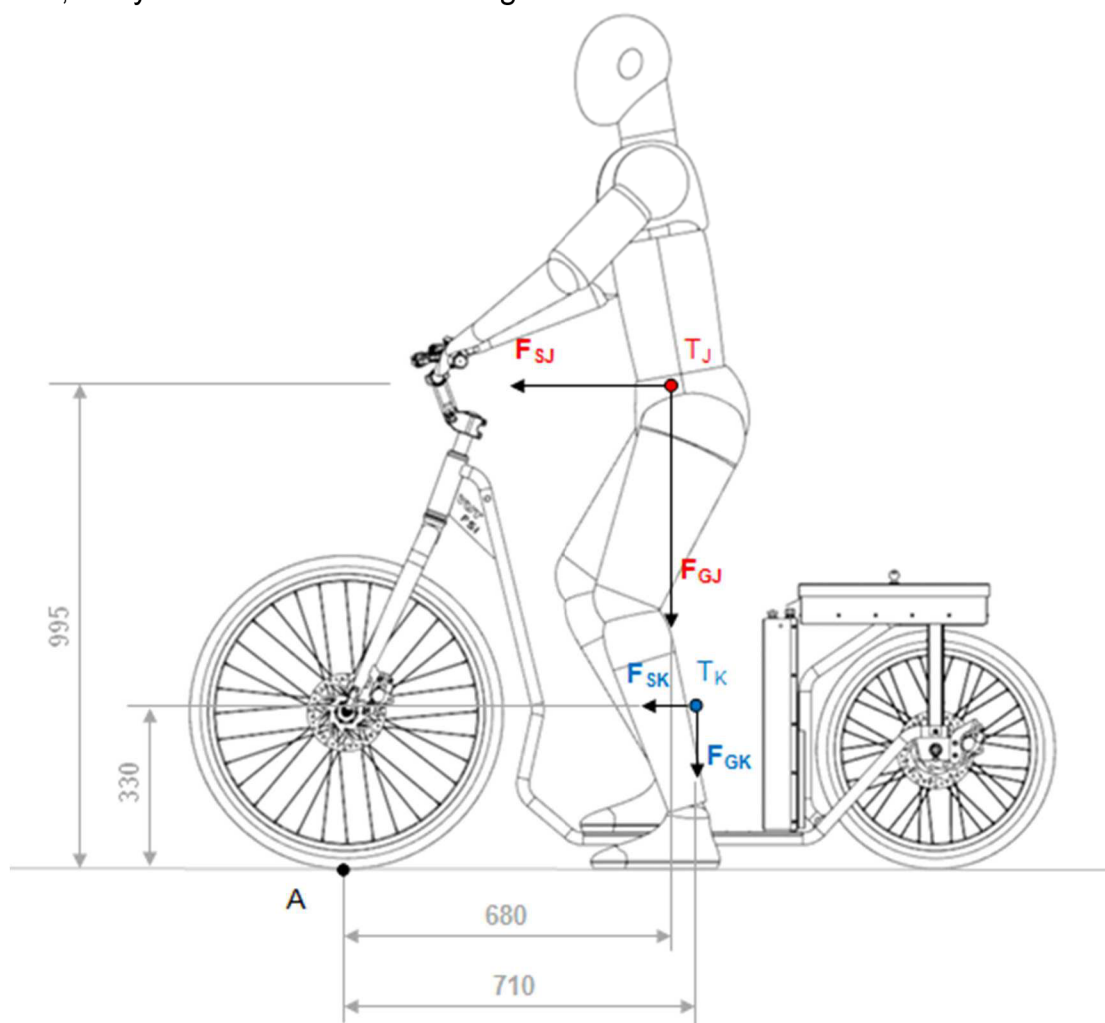
Tab. 15 - Ekonomické zhodnocení

<b>SUMARIZACE</b>			<b>Kč bez DPH</b>	<b>hmotnost [g]</b>
kupované komponenty cyklo			4.933	5.050
kupované komponenty elektro			13.809	6.700
materiál			2.150	-
výroba (rám, držák, bateriový kryt, kompletace)			7.000	9.850
<b>celkem</b>			<b>27.892 Kč</b>	<b>21.600 g</b>



## 11 Kontrola rovnováhy

V poslední části, když už známe celkový tvar a hmotnost koloběžky, je nutné ověřit jednu z nejdůležitějších podmínek pro bezpečné brzdění. Tou je rozložení hmotnosti v dotykových bodech předního a zadního kola tak, aby ještě nedošlo k porušení rovnováhy - **přepadnutí jezdce přes řídítka**. Toto nebezpečí hrozí zejména u malých skládatelných koloběžek, kde je charakteristickým prvkem malý rozvor kol a vysoká poloha těžiště jezdce. U sportovních koloběžek riziko s rostoucím rozvorem klesá, ale je stále přítomné. Následně vypočteme jaké maximální zrychlení je, v případě brzdění na rovině, ještě bezpečné. Uvedený ilustrační příklad obsahuje jezdce, který měří 185cm a váží 100kg



Obr. 72 - Rovnováha při brzdění

### Výpočet kritického zpomalení:

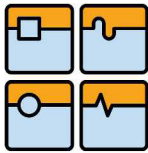
Při zablokování předního kola se v místě dotyku A vytvoří točivý moment:

$$M_A = 0.995F_{SJ} + 0.330F_{SK} - 0.680F_{GJ} - 0.710F_{GK} [Nm]$$

kde:

- $F_{SJ}$  [N] - setrvačná síla jezdce, vzniklá při brzdění
- $F_{SK}$  [N] - setrvačná síla koloběžky, vzniklá při brzdění
- $F_{GJ}$  [N] - tíhová síla jezdce
- $F_{GK}$  [N] - tíhová síla koloběžky





Horizontální a tíhová síla jezdce a koloběžky je podle vztahu:

$$F_{SJ} = m_J b_k ; F_{SK} = m_K b_k ; F_{GJ} = m_J g ; F_{GK} = m_K g \text{ [N]}$$

kde:

- $m_J$  [kg] - hmotnost koloběžky (21,60kg)
- $m_K$  [kg] - hmotnost jezdce (100kg)
- $b_k$  [ $\text{ms}^{-2}$ ] - hledané kritické zpomalení
- $g$  [ $\text{ms}^{-2}$ ] - tíhové zrychlení ( $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$ )

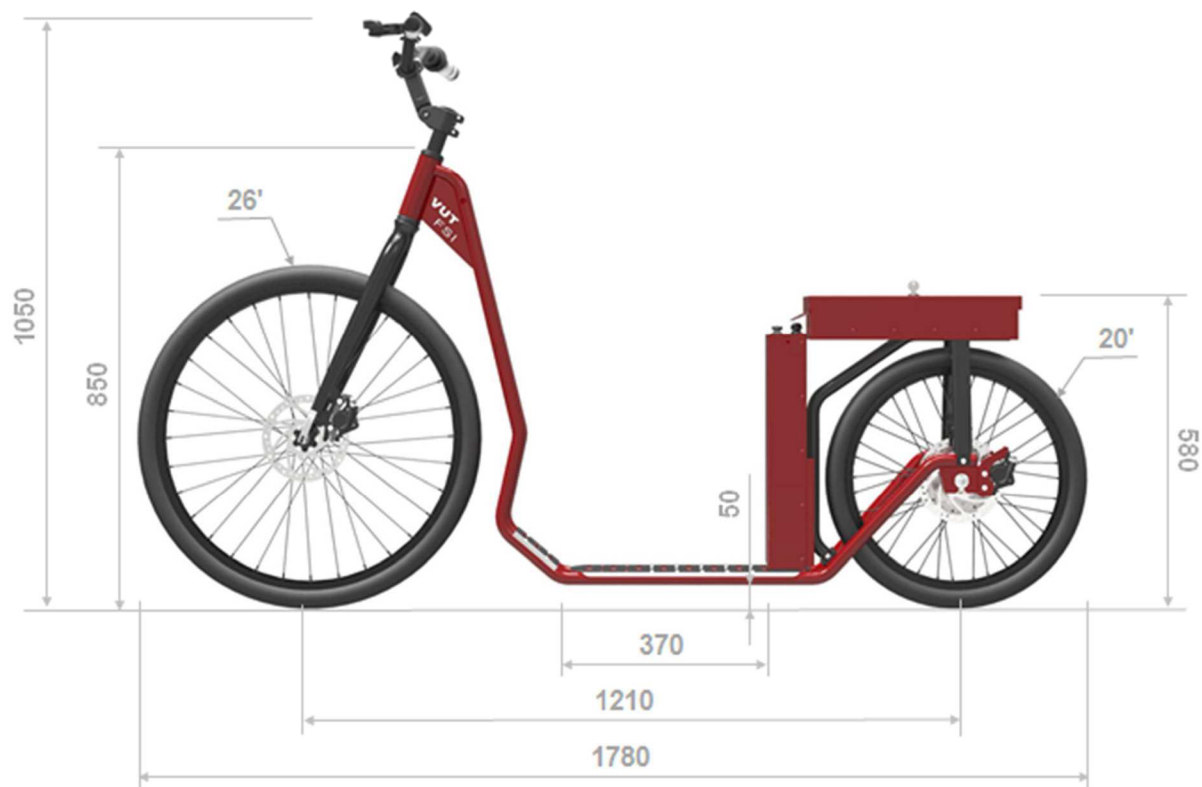
Dosazením výše uvedených vztahů do momentové rovnice v bodě A a položením pravé strany nule získáme hledanou velikost kritického zpomalení  $b_k$

$$M_A = 0 ;$$

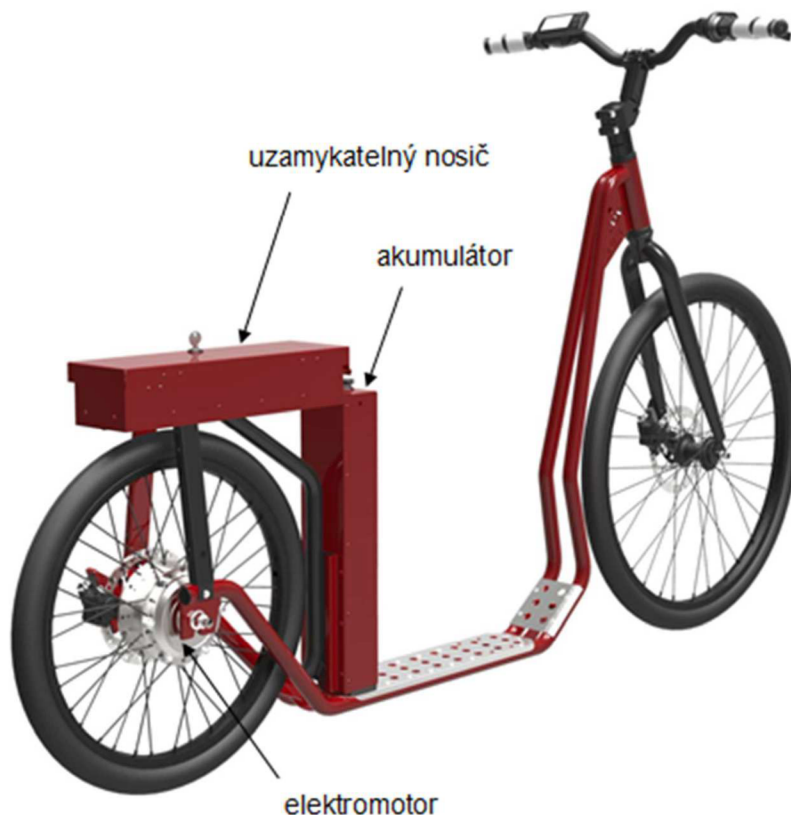
$$b_k = \frac{0.680F_{GJ} + 0.710F_{GK}}{0.995m_J + 0.330m_K} = \underline{7,67 \text{ ms}^{-2}}$$

Vypočtená hodnota kritického zpomalení představuje dostatečně vysokou hodnotu. Nicméně je nutné brát zřetel i na brzdění v situaci, kdy koloběžka jede z kopce. V takovém případě bude, v závislosti na stoupání kopce, velikost kritického zrychlení klesat a riziko přepadení stoupat. Je ale nutné si uvědomit, že zablokování předního kola nastane ve výjimečných případech, v závislosti na povrchu, přilnavosti, rozdělení brzdných sil, apod. Ve velké míře se bude jen odvalovat, prokluzovat nebo zcela klouzat.

## 12 Hotový návrh elektrické koloběžky



Obr. 73 - Rozměry koloběžky



Obr. 74 - Hotový návrh koloběžky

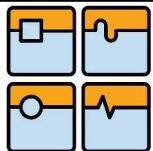
## 12.1 Seznam parametrů

### Obecné vlastnosti

Délka	1780 mm
Šířka řídítek	600 mm
Hmotnost	21 kg
Nosnost	100 kg
Šířka nášlapu	100 mm
Délka nášlapu	370 mm
Světlá výška nášlapu	50 mm
Výška nášlapu	75 mm
Velikost předního kola	26"
Velikost zadního kola	20"
Výška řídítek	1050 mm

### Elektro výbava

Výkon elektromotoru	500W
Typ motoru	BLDC 36V s planetovou převodovkou
Řídící jednotka	TDK 2W s LCD programovatelným displejem
Akumulátor	LiFePO4 / 36V / 10 Ah
Doba nabíjení	4 hod
Maximální rychlost	25 km/h
Dojezd	30 km



### Vybavení

Brzdy

Obutí

Představec

Ráfky

Řídítka

Náboje

hydraulické Shimano Deore

Schwalbe

MTB

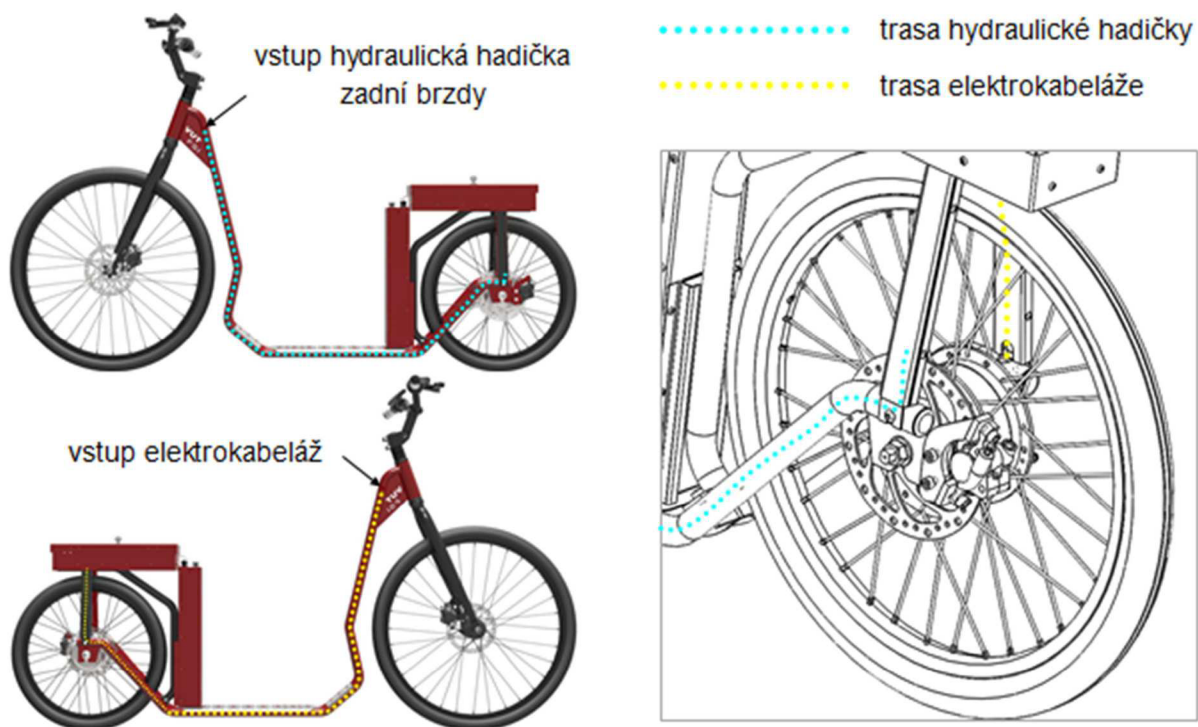
dvoukomorové

treková

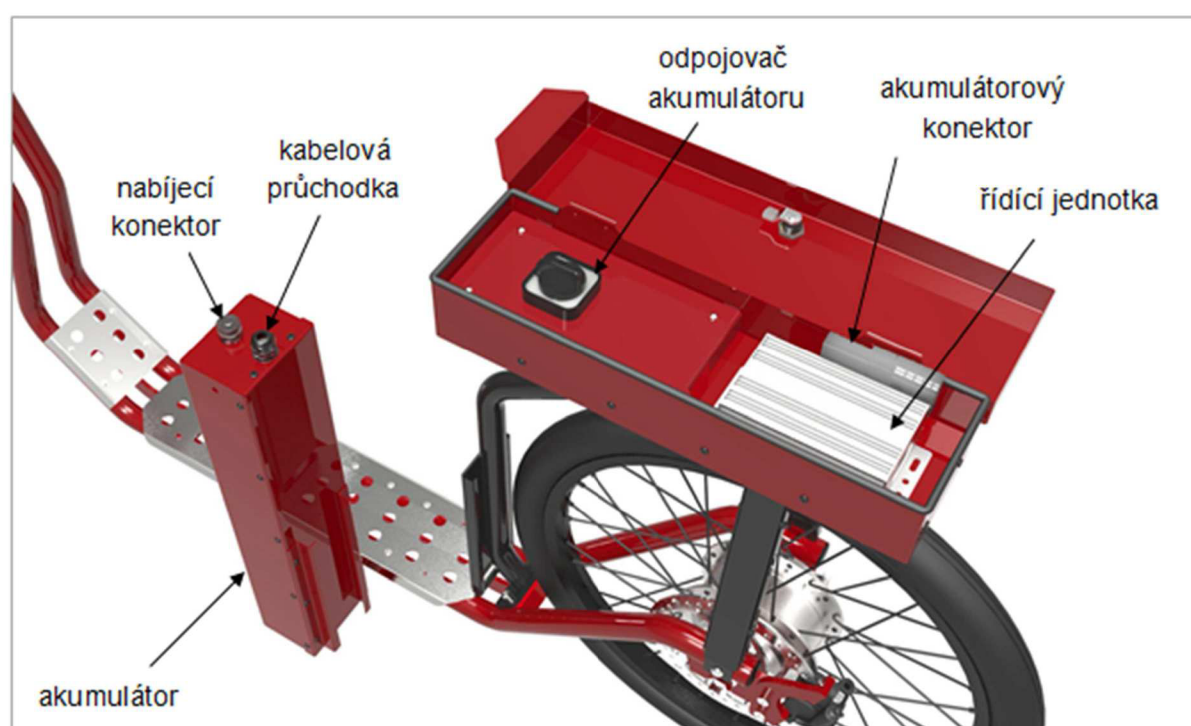
Shimano



Obr. 75 - Pohled na řídítka



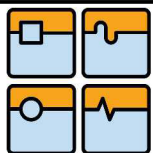
Obr. 76 - Skryté vedení brzdové hadičky a elektro kabeláže



Obr. 77 - Uložení elektro komponent



Obr. 78 - Čelní a zadní pohled



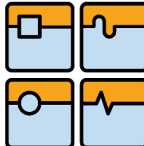
### Závěr

Cílem této práce bylo konstrukční řešení koloběžky poháněné elektromotorem. Pro motorizaci jsme si vybrali typ sportovní koloběžky, která je spíše určena dospělým a aktivním jedincům. Náš záměr byl, aby jezdec používal elektromotor spíše jako pomocný člen a ne se jím pouze vozil. Mohl by tak efektivně prodloužit svůj maximální dojezd a zpříjemnit si pocit z jízdy, hlavně v kopcovitých úsecích cesty. Původně jsme tedy zamýšleli použít elektromotor o slabém výkonu (250W), který zároveň jako jediný schvaluje legislativa pro použití na pozemních komunikacích, bez nutnosti homologace a řídičského oprávnění. Nicméně na základě osobních zkušeností jsme výpočtovou část jízdních vlastností započali s motorem o výkonu 500W. Ten se nám posléze ukázal jako uspokojivá volba, s maximální rychlostí kolem 28 km/h na rovině a dojezdem cca 30 km při ideálních podmínkách. S ohledem na tyto výsledky jsme od dalšího zkoušení 250W motoru upustili a pro následnou konstrukci už uvažovali pouze 500W variantu.

Pro zjištění základních parametrů geometrie rámu jsme použili analytických a numerických postupů. Jako materiál jsme zvolili konstrukční ocel, vzhledem k dobrým mechanickým vlastnostem, nízké ceně, přijatelné dostupnosti a výborné obrobitelnosti a svařitelnosti. Negativem této volby je bezpochyby větší hmotnost. Z tohoto důvodu jsme se snažili použít tento materiál co možná neúčinněji. Pomocí numerické optimalizace jsme docílili přijatelné konstrukce, která je tvořena dvojicí ohýbaných trubek o rozměru 25x3mm a místy vhodně zpevněna příslušnými díly. Velikost deformace při simulaci statického zatížení nám vyšla ve stejné míře jako u koloběžek obdobné konstrukce. Už z pohledu na tvar rámu je jasně patrné, že nelze očekávat podobnou tuhost, jakou vykazují například rámy jízdních kol. Poslední fáze zahrnovala návrh ostatních dílů. Zejména se jedná o jednotku nosiče a akumulátorového obalu. Nosič obsahuje všechny komponenty nutné pro řízení elektromotoru a ještě poskytuje malý uzamykatelný prostor (např. pro peněženku). Jistě velkou výhodou je i vyjímatelný akumulátor. V konečné verzi návrhu není zahrnuta povinná cyklo výbava (světla, odrazky, atd.), jelikož ji není obtížné v případě nutnosti přidat, neboť se všechno jedná o díly, které se instalují neinvazivní cestou.

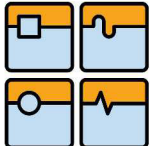
Závěrem můžeme konstatovat, že další postup v návrhu elektrické koloběžky by měla být výroba prototypu.



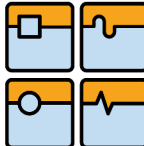
	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 78
	<b>DIPLOMOVÁ PRÁCE</b>	

### Použité informační zdroje

- [1] THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. *Electric Bicycles- A Guide to Design and Use*. 1. vyd. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2006. ISBN 13 978-0-471-67419-1.
- [2] HRUBÍŠEK, Ivo. *Elektrokola: nová dimenze cyklistiky*. 1. vyd. Plzeň: Cykloknihy, 2011, 131 s. ISBN 978-80-87193-18-1.
- [3] CIBULA, Karel. *Mechanika jízdního kola*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004, 90 s. ISBN 80-010-3016-4.
- [4] VLK, František. *Dynamika motorových vozidel: jízdní odpory, hnací charakteristika, brzdění, odpružení, říditelnost, ovladatelnost, stabilita*. 1. vyd. Brno: VLK, 2000, 434 s. ISBN 80-238-5273-6.
- [5] -*The ebike book*. New York, NY: TeNeues Pub., 2013, p. cm. ISBN 978-383-2797-010.
- [6] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 5., upr. vyd. Úvaly: Albra, 2011, xiv, 927 s. ISBN 978-80-7361-081-4.
- [7] -Basic Care and Trouble Shooting of a LiFePO4 E-bike Battery. *Electricbike.com* [online]. 2013 [cit. 2014-03-11]. Dostupné z: <http://www.electricbike.com/lifepo4-battery/>
- [8] Vše o bateriích: Jaké baterie (akumulátory) se používají v elektrických kolech. *Ekolo.cz* [online]. 2013 [cit. 2014-03-11]. Dostupné z: <http://ekolo.cz/baterie2>
- [9] Yedoo Mezeq New. *YEDOO* [online]. 2013 [cit. 2014-03-19]. Dostupné z: <http://www.yedoo.eu/cz/kolobezky-yedoo/yedoo-mezeq-new/v-brake.aspx>
- [10] Koloběžky skládací: Micro Rocket koloběžka. *SvětKoloběžek.cz* [online]. 2013 [cit. 2014-03-19]. Dostupné z: <http://www.svetkolobezek.cz/kolobezky-skladaci/micro-rocket-kolobezka/>
- [11] Maui Predator Black/Blue. *Gizmania.cz* [online]. 2013 [cit. 2014-03-20]. Dostupné z: <http://www.gizmania.cz/maui-predator-black-blue.html>
- [12] Extreme sports. *Tresixty.com* [online]. 2012 [cit. 2014-03-28]. Dostupné z: <http://www.tresixty.com/story/extreme-sports>
- [13] Products: Micro Kickboard®. *ScooterVersity.com* [online]. 2012 [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://www.scooterversity.com/#products>
- [14] Sbyke P-20 Scooter Skateboard Bike Hybrid. *GeekAlerts.com* [online]. 2012 [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://www.geekalerts.com/sbyke-p-20-scooter-skateboard-bike-hybrid/>

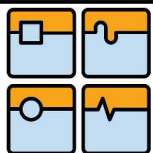
	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 79
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

- [15] Předpis č. 361/2000 Sb.: Zákon o provozu na pozemních komunikacích a o změnách některých zákonů. *Zakonyprolidi.cz* [online]. 2012 [cit. 2014-03-28]. Dostupné z: <http://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-361>
- [16] Skutrmania: Motokoloběžky aneb skútry trochu jinak. OLIVA, Matěj. *Skutrmania.cz* [online]. 2010 [cit. 2014-03-28]. Dostupné z: <http://skutrmania.cz/clanek/75-motokolobezky-aneb-skutry-trochu.html>
- [17] BLATA S.R.O. *Katalog produktů: SCOOTER BLATINO W/kit*. Blansko, 2011. Dostupné z: <http://www.blata.cz/download/1-datum-1.html>
- [18] ČECHMAN, Honza. Svět koloběžek: Jak vypadá náš trh?. *Svět motorek*. 2003, č. 8. Dostupné z: <http://www.bert.cz/mototesty/svetkolobezek.html>
- [19] Převodovka: převodovka, vč. řemenu a rozetky. *CityMotors* [online]. 2013 [cit. 2014-04-05]. Dostupné z: <http://www.motokolobezky.cz/cs/nahradnidily/nitro-xg07-xg09-xg10/prevodovka>
- [20] 10 Point Hub Motor Break Down. *ElectricBike.com* [online]. 2012 [cit. 2014-04-05]. Dostupné z: <http://www.electricbike.com/hubmotors/>
- [21] Geared Hub Motors vs Direct Drive: BMC vs Crystalyte. *ElectricBike.com* [online]. 2012 [cit. 2014-04-15]. Dostupné z: [www.electricbike.com/hubmotor/](http://www.electricbike.com/hubmotor/)
- [22] Nine Continent Hub Motor 9C. *ElectricBikes.com* [online]. 2012 [cit. 2014-04-15]. Dostupné z: <http://www.electricbike.com/9c/>
- [23] LiFePO4 Battery: 36V/10Ah. *PingBattery* [online]. 2012 [cit. 2014-04-15]. Dostupné z: <http://www.pingbattery.com/servlet/the-8/36V-10AH-V2.5>
- [24] EBike Controller 36 to 72Vdc. *GrabCad* [online]. 2013 [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://goo.gl/2CuIWF>
- [25] RAZOR LTD. *Electric Scooters* [online]. 2013 [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://www.razor.com/>
- [26] Apache Infant: ELEKTROKOLA. *PREkolo* [online]. 2013 [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: <http://www.prekolo.cz/cs/nabidka-elektrokol/apache-infant/>
- [27] Hub Motors. *EBikes.ca* [online]. 2012 [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: <http://www.ebikes.ca/learn/hub-motors.html>
- [28] Souhrnný přehled: Průměrná rychlost větru. *Česky hydrometeorologický úřad* [online]. 2014 [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: <http://www.bit.ly/SNfmJh>
- [29] PEDELEC ERSATZAKKU. MTML TRADING GMBH. *Ebikeakkus.de* [online]. 2014 [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://www.ebikeakkus.de/de/fahrradakkus/pedelec-ersatzakku/>

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 80
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

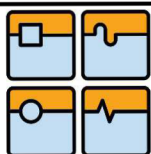
- [30] Vačkové spínače: řada S..JD. *SEZ-CZ s.r.o.* [online]. 2014 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.sez-cz.cz/index.php?p=kr-vackove-spinace-rada-s-j&lng=cs>
- [31] KCK CYKLOSPORT-MODE S.R.O. *FORCE.cz* [online]. 2014 [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://www.force.cz/>
- [32] BHS-28: HIGHSIX. *BBB* [online]. 2014 [cit. 2014-05-09]. Dostupné z: <http://cz.bbbcycling.com/bike-parts/stems/BHS-28>
- [33] SHIMANO BRM395. *Všeprocolo.cz* [online]. 2013 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://www.vseprokolo.cz/hydraulicke-brzdy-predni-zadni-shimano-brm395-bez-kotoucu-74751>
- [34] RALF BOHLE GMBH. *SCHWALBE* [online]. 2014 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://www.schwalbe.com/en/>
- [35] REMERX S.R.O. *REMERX* [online]. 2014 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z: <http://remerx.cz/>
- [36] ECOTECH: Elektropohony do kol. *ECOTECH* [online]. 2013 [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://www.ecotech.cz/elektrokola-motory/>
- [37] -Letskickscoot.com: scooterGallery. *Letskickscoot.com* [online]. 2013 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: [letskickscoot.com/KS\\_gallery/scooterGallery\\_01\\_02.jpg](http://letskickscoot.com/KS_gallery/scooterGallery_01_02.jpg)



**Seznam použitých zkratk a symbolů**

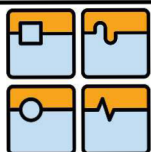
a	[m/s <sup>2</sup> ]	zrychlení
b <sub>k</sub>	[m/s <sup>2</sup> ]	kritické zpomalení
C <sub>d</sub>	[-]	koeficient aerodynamického odporu
D	[m]	vnější průměr mezikruží
d	[m]	vnitřní průměr mezikruží
d <sub>1</sub>	[m]	průměr ložiska
d	[m]	průměr kola
d <sub>k</sub>	[m]	průměr poháněného kola
dW	[-]	parciální derivace energie napjatosti
E	[Pa]	modul pružnosti v tahu
f	[-]	rameno valivého odporu
F <sub>AX</sub>	[N]	x-ová složka síly FA
F <sub>AY</sub>	[N]	y-ová složka síly FA
F <sub>BX</sub>	[N]	x-ová složka síly FB
F <sub>BY</sub>	[N]	y-ová složka síly FB
F <sub>c</sub>	[N]	celková velikost jízdních odporů
F <sub>f</sub>	[N]	odpor valivého tření
F <sub>G</sub>	[N]	tíhová síla
F <sub>GJ</sub>	[N]	tíhová síla jezdce
F <sub>GK</sub>	[N]	tíhová síla koloběžky
F <sub>L</sub>	[N]	síla působící na obvodu kola
F <sub>ST</sub>	[N]	odpor stoupání
F <sub>SJ</sub>	[N]	setrvačná síla jezdce
F <sub>SJ</sub>	[N]	setrvačná síla koloběžky
F <sub>T</sub>	[N]	akcelerující síla
F <sub>vz</sub>	[N]	odpor vzdušný
g	[m/s <sup>2</sup> ]	gravitační zrychlení
G	[N]	zatížení ložiska
H	[m]	vertikální přetížení
i	[-]	součinitel odporu valení ložiska
I	[A]	proud
J <sub>xT</sub>	[m <sup>4</sup> ]	osový kvadratický moment průřezu
K <sub>p</sub>	[-]	bezpečnost k meznímu stavu pružnosti
L	[m]	ujetá vzdálenost

m	[kg]	hmotnost koloběžky + jezdce
$M_A$	[Nm]	točivý moment k bodu A
$M_K$	[Nm]	točivý moment elektromotoru
$M_L$	[Nm]	odporový moment ložiska
$M_n$	[Nm]	točivý moment
$M_o$	[Nm]	ohybový moment
n	[ot/min]	otáčky
N	[N]	normálová síla
$P_c$	[W]	výkon k překonání jízdních odporů
$P_i$	[W]	příkon
$P_o$	[W]	výkon
$P_{vz}$	[W]	výkon k překonání vzdušného odporu
$R_e$	[MPa]	mez kluzu
$r_k$	[m]	poloměr poháněného kola
s	[-]	stupeň statické určitosti
S	[m <sup>2</sup> ]	obsah průřezu
$S_c$	[m <sup>2</sup> ]	velikost čelní plochy
T	[N]	posouvající síla
U	[V]	napětí
$v_k$	[m/s]	odpor stoupání
$V_K$	[m/s]	rychlost koloběžky
$V_r$	[m/s]	relativní rychlost
$V_v$	[m/s]	rychlost větru
$W_f$	[W]	výkon pro překonání valivého odporu
$W_o$	[m <sup>3</sup> ]	modul průřezu v ohybu
$\alpha$	[°]	úhel stoupání
$\eta$	[%]	účinnost
$\vartheta$	[-]	počet použitelných podmínek
$\mu$	[-]	počet neznámých parametrů
$\pi$	[-]	Ludolfovo číslo
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota vzduchu
$\sigma_{max}$	[MPa]	maximální napětí
$\sigma_N$	[MPa]	normálové napětí

**Seznam obrázků**

Obr. 1 - Koloběžka Yedoo [9] .....	11
Obr. 2 - Koloběžka Yedoo[9] .....	11
Obr. 3 - Koloběžka Rocket [10] .....	12
Obr. 4 - Koloběžka Rocket [10] .....	12
Obr. 5 - Freestyle koloběžka [11] .....	13
Obr. 6 - Freestyle koloběžka [11] .....	13
Obr. 7 - Jízda na U-rampě [12].....	13
Obr. 8 - Micro Monster kickboard [13] .....	14
Obr. 9- SByke P20 [14] .....	14
Obr. 10 – Koloběžka Blatino poháněná spalovacím motorem .....	16
Obr. 11 - Převodovka jednostupňová, uzavřená s ozubenými koly   převodovka jednostupňová řemenová  převodovka dvoustupňová řemenová[19] .....	17
Obr. 12 - Elektromotor s planetovou převodovkou [21] .....	18
Obr. 13 - Elektromotor 9C [23] .....	18
Obr. 14 - Stator elektromotoru 9C [23] .....	18
Obr. 15 - Akumulátor LiFePO4 36V/10Ah[23] .....	20
Obr. 16 - Řídící jednotka [24] .....	20
Obr. 17 - Funkce řídicí jednotky v obvodu .....	21
Obr. 18 - Skladná koloběžka Razor [25] .....	22
Obr. 19 - Neskladná varianta Apache Infant [26].....	22
Obr. 20 - ilustrativní obrázek .....	23
Obr. 21 - ilustrativní obrázek .....	23
Obr. 22 - Rozklad tíhové síly při stoupání .....	25
Obr. 23 - Jízda v předklonu .....	26
Obr. 24 - Otáčková charakteristika motoru BPM 36V, 500W .....	29
Obr. 25 - Elektromotor Bafang BPM 36V, 500W [27] .....	30
Obr. 26 - Návrhový postup rámu elektrické koloběžky .....	37
Obr. 27 - Ilustrativní zobrazení koloběžky .....	38
Obr. 28 - Zjednodušený model koloběžky .....	39
Obr. 29 - Uvolněné těleso koloběžky - rozjezd.....	40
Obr. 30 - Částečné uvolnění - rozjezd.....	40
Obr. 31 - Statický rozbor - rozjezd.....	41
Obr. 32 - Řez 1.....	41
Obr. 33 - Řez 2.....	42
Obr. 34 - Řez 3.....	42
Obr. 35 - Řez 4.....	42
Obr. 36 - Řez 5.....	43
Obr. 37 - Řez 6.....	43
Obr. 38 - Řez 7.....	44
Obr. 39 - Mezikruží.....	45

Obr. 40 - VVÚ rozjezd - N .....	46
Obr. 41 - VVÚ rozjezd - T.....	46
Obr. 42 - VVÚ rozjezd - Mo.....	47
Obr. 43 – Uvolněné těleso - brzdění .....	50
Obr. 44 - Částečné uvolnění - brzdění .....	51
Obr. 45 - Statický rozbor - brzdění .....	51
Obr. 46 - Grafické znázornění VVÚ – N.....	53
Obr. 47 - Grafické znázornění VVÚ - T .....	53
Obr. 48 - Grafické zobrazení VVÚ - Mo .....	54
Obr. 49 - Návrh geometrie rámu .....	55
Obr. 50- Upravená geometrie rámu .....	56
Obr. 51 - Rámové komponenty .....	57
Obr. 52 - Vysíťovaný model s naznačeným zatížením a vazbami .....	58
Obr. 53 - Deformace rámu, profil Ø20x2,5, situace 1.....	59
Obr. 54 - Deformace rámu, profil Ø25x3,0, situace 1.....	59
Obr. 55 – Intenzita napětí – situace 1 .....	60
Obr. 56 - Deformace rámu, zvětšená 10x, situace 1 .....	61
Obr. 57 – Intenzita napětí – situace 2 .....	61
Obr. 58 - Hotový návrh rámu koloběžky.....	62
Obr. 59 - LiFePO4 bateriový balíček, 36V 9,6 Ah [29] .....	63
Obr. 60 - Obal na akumulátor.....	64
Obr. 61 - Řídící jednotka.....	65
Obr. 62 - AMP Power Series 50, grey [31].....	65
Obr. 63 - Vačkový spínač [30].....	66
Obr. 64 - Nosič.....	66
Obr. 65 - Nosič s komponenty.....	67
Obr. 66 - Programovatelná jednotka a regulátor na řídících .....	68
Obr. 67 - Zapojení elektrokomponent .....	68
Obr. 68 - Řídítka FORCE Trek [31].....	69
Obr. 69 - Představec BBB BHS 28 [32].....	69
Obr. 70 - Brzdy Shimano M395 [33].....	69
Obr. 71 - Vidlice FORCE [31].....	69
Obr. 72 - Rovnováha při brzdění.....	72
Obr. 73 - Rozměry koloběžky.....	73
Obr. 74 - Hotový návrh koloběžky .....	74
Obr. 75 - Pohled na řídítka.....	75
Obr. 76 - Skryté vedení brzdové hadičky a elektrokabeláže .....	75
Obr. 77 - Uložení elektrokomponent .....	76
Obr. 78 - Čelní a zadní pohled.....	76

**Seznam tabulek**

Tab. 1 - Srovnání akumulátorů rozdílných typů.....	20
Tab. 2 - Mezní parametry měřeného motoru.....	29
Tab. 3 - Část tabulky zaznamenaných dat z měření motoru.....	30
Tab. 4 - Výkon koloběžky - numerické řešení .....	33
Tab. 5 - Výsledek numerického řešení.....	35
Tab. 6 - Velikost dojezdu koloběžky.....	36
Tab. 7 – Výsledek analytické části 1 .....	49
Tab. 8 - Výsledek analytické části 2.....	54
Tab. 9 - Materiálové charakteristiky .....	58
Tab. 10 - Výsledky FEM analýza - rozjezd.....	60
Tab. 11 - Výsledky FEM analýza - brzdění .....	62
Tab. 12 - Přehled parametrů akumulátoru .....	63
Tab. 13 - Seznam nakupovaných komponent.....	70
Tab. 14 - Výpis výroby a materiálu.....	71
Tab. 15 - Ekonomické zhodnocení.....	71

### Seznam příloh

115788VUT_14-01.00	ELEKTRICKÁ KOLOBĚŽKA	výkres sestavy
115788VUT_14-01.01	RÁMOVÁ TRUBKA	výkres součásti
115788VUT_14-02.00	VÝZTUHA NÁŠLAP	výkres součásti
115788VUT_14-04.00	NOSIČ	výkres sestavy
115788VUT_14-04.01	TRUBKA	výkres součásti
115788VUT_14-04.02	SPODNÍ DÍL	výkres součásti
115788VUT_14-04.03	POSTRANNÍ DÍL	výkres součásti
115788VUT_14-04.04	VIKO	výkres součásti
115788VUT_14-04.05	VANICKA	výkres součásti
115788VUT_14-04.06	STOJNA	výkres součásti
115788VUT_14-04.07	KRYTKA STOJNA	výkres součásti
115788VUT_14-04.08	AKUMULATOROVY DRŽÁK	výkres součásti
115788VUT_14-04.09	KRYTKA	výkres součásti
115788VUT_14-04.10	PŘÍRUBA	výkres součásti
115788VUT_14-06.00	OBAL AKUMULÁTORU	výkres sestavy
115788VUT_14-06.01	VÍKO	výkres součásti
115788VUT_14-06.02	VODÍCÍ LIŠTA	výkres součásti
115788VUT_14-06.03	OBAL	výkres součásti
115788VUT_14-08.01	HLAVOVÁ TRUBKA	výkres součásti