



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## DIFERENCIÁL HPV

HUMAN POWERED VEHICLE DIFFERENTIAL

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ladislav Andrlík

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Kaplan, CSc.

BRNO 2017

# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **Bc. Ladislav Andrlík**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Automobilní a dopravní inženýrství  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Zdeněk Kaplan, CSc.**  
Akademický rok: 2016/17

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:

## Diferenciál HPV

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem diplomové práce je komplexní studium problematiky silničních vozidel poháněných lidskou silou a na základě získaných poznatků zpracovat konstrukční návrh diferenciálu určeného pro tříkolku poháněnou lidskou silou určenou pro seniory a do městského provozu.

### Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce magisterského studia je konstrukční návrh diferenciálu silničního vozidla poháněného lidskou silou určeného pro každodenní jízdu ve městě se zaměřením na starší uživatele. Práce bude obsahovat zhodnocení současných konstrukcí, vlastní konstrukční návrh, výkres sestavy, pevnostní kontrolu a výrobní výkresy vybraných dílů, vlastní kritické zhodnocení a závěr práce.

### Seznam doporučené literatury:

JAN, Zdeněk, ŽDÁNSKÝ, Bronislav a ČUPERA Jiří. Automobily (2): Převody. Brno: Avid, spol. s r.o., 2009. 155s. ISBN 978-80-87143-12-4.

BUDYNAS, Richard G., NISBETT, J. Keith a SHIGLEY, Joseph Edward. Shigley's mechanical engineering design. 10th edition. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2015. 1104 s. ISBN 0073398209.

ACHTENOVÁ, Gabriela. Převodná ústrojí motorových vozidel: diferenciály a děliče momentu. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2015. 56 s. ISBN 978-80-01-04855-9.



Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je konstrukční návrh diferenciálu silničního vozidla poháněného lidskou silou určeného pro každodenní jízdu ve městě se zaměřením na starší uživatele. Vozidlem, pro které je diferenciál určen, je v této práci výhradně šlapací tříkolka. V úvodu práce je krátce nastíněna historie tříkolových šlapacích vozidel. V druhé kapitole jsou postupně vysvětleny některé odborné termíny týkající se tříkolek a bicyklů obecně. Další kapitoly řešeršní části práce pak popisují současné konstrukce tříkolek, princip funkce diferenciálu u motorových vozidel a konstrukční možnosti diferenciálu pro šlapací tříkolky. Praktická část mé práce obsahuje návrh diferenciálu pro šlapací tříkolku, pevnostní kontrolu vybraných částí diferenciálu, výkresy sestavy diferenciálu, výrobní výkresy vybraných dílů a návrh a výpočet přenosu hnacího momentu od pedálů na diferenciál.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Diferenciál, vozidlo poháněné lidskou silou, diferenciál pro tříkolky, diferenciál HPV

## ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is the design of the differential of a road vehicle driven by a human force, intended for daily driving in the city with a focus on older users. The vehicle for which the differential is designed is strictly a pedal tricycle. The introduction of this thesis briefly outlines the history of pedal tricycles. The second chapter explains some technical terms relating to tricycles and bicycles in general. Further chapters of the research part describe the current structures of tricycles, the principle of a differential function in motor vehicles and design possibilities of the differential for pedal tricycles. The practical part of my work includes the design of a differential for pedal tricycle, the strength analysis of selected parts of the differential, drawings of the differential assembly, production drawings of selected parts and proposal of the torque transfer from pedals to the differential.

## KEYWORDS

Differential, HPV - Human Powered vehicle, differential for tricycles, differential HPV

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ANDRLÍK, L. *Diferenciál HPV*. Brno, 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 68 s. Vedoucí diplomové práce Zdeněk Kaplan.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Zdeňka Kaplana, CSc. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 26. května 2017

.....

Ladislav Andrlík

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Zdeňku Kaplanovi, CSc., za odborné konzultace, rady a připomínky týkající se obsahové a formální úpravy práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Pavlu Ramíkovi za odborné rady a konzultace při tvorbě pevnostních výpočtů. Chtěl bych také poděkovat celé svojí rodině a svým nejbližším za podporu během celého studia.

## OBSAH

Úvod .....	10
1 Historie tříkolového vozidla poháněného lidskou silou .....	11
2 Objasnění odborných termínů .....	14
2.1 HPV .....	14
2.2 Konfigurace Delta .....	14
2.3 Konfigurace Tadpole .....	14
2.4 Převodník .....	14
2.5 Přesmykač .....	15
2.6 Recumbent Tricycles .....	15
2.7 Rikša .....	15
2.8 Přehazovačka a kazety .....	16
3 Současné konstrukce šlapacích tříkolek .....	17
3.1 Rozdělení tříkolek podle rozmístění kol .....	17
3.2 Rozdělení tříkolek podle polohy těla jezdce .....	19
3.3 Rozdělení tříkolek podle účelu použití .....	20
4 Diferenciál .....	23
4.1 Kuželový diferenciál .....	25
4.2 Čelní diferenciál .....	29
5 Diferenciál pro šlapací tříkolky .....	30
5.1 Možnosti rozdělení točivého momentu .....	30
5.2 Možnosti přenosu momentu z pedálů na diferenciál .....	34
6 Vstupní parametry diferenciálu .....	36
7 Návrh přenosu hnacího momentu od pedálů na kola .....	37
7.1 Převodník s klikou .....	38
7.2 Primární řetěz .....	38
7.3 Přehazovačka s kazetami .....	39
7.4 Vložený náboj .....	40
7.5 Sekundární převod .....	40
8 Návrh diferenciálu .....	42
8.1 Kuželové soukolí s čepem .....	45
8.2 Klec .....	47
8.3 Hnací víko .....	48
8.4 Víko .....	49
8.5 Ložiska .....	50
8.6 Ostatní části diferenciálu .....	50

---

8.7	Mazání diferenciálu .....	52
8.8	Montážní postup .....	52
9	Pevnostní kontrola .....	55
9.1	Kuželové soukolí .....	55
9.2	Sekundární řetěz .....	55
9.3	Hnací víko.....	56
9.4	Klec a čep.....	58
10	Zhodnocení .....	62
	Závěr.....	63
	Seznam použitých zkratk a symbolů .....	67
	Seznam příloh.....	68

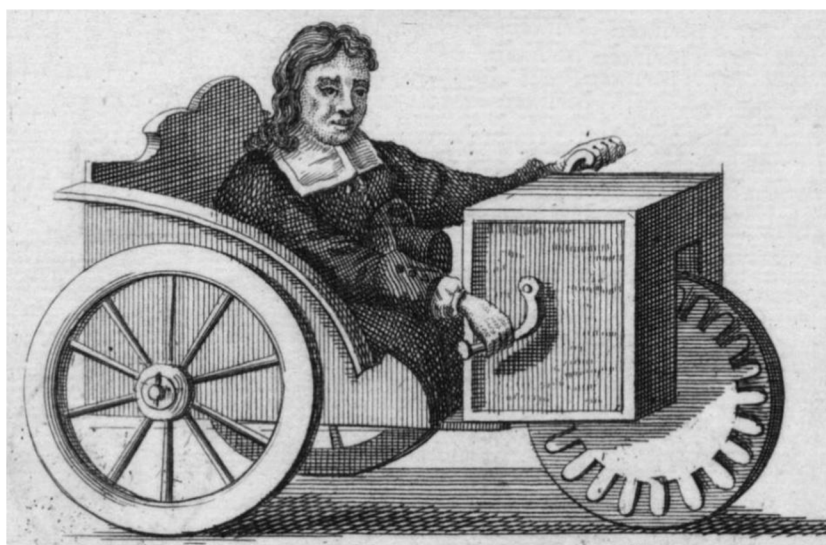
## ÚVOD

V dnešní době, kdy je kladen velký důraz na snižování emisí, je cestování vozidly poháněnými lidskou silou velmi populární a žádané. Hlavním zástupcem těchto vozidel, pohybujících se po pevné zemi, je bezesporu jízdní kolo. Většina lidí ho používá jako dopravní prostředek ve městech nebo na kratší vzdálenosti. Bicykl je však populární i mezi sportovci, kteří si díky němu udržují fyzickou kondici, případně mezi dobrodruhy, kteří na kole poznávají krásy světa. Pro všechny tyto účely lze kromě bicyklu využít také šlapací tříkolku. Tříkolka totiž kromě všech výhod, které sdílí s bicyklem (jednoduchost, nulová produkce emisí, atd.), disponuje ještě jednou výhodou. Při jízdě na tříkolce totiž není nutné udržovat rovnováhu. To ocení zvláště děti, starší lidé s omezenou pohyblivostí, případně osoby s poruchou motoriky. Tříkolky také bývají vybaveny většími úložnými prostory, například košíkem pro převoz nákupu z obchodu. Na výraznější nevýhodu tříkolky narazíme ve chvíli, kdy chceme pohánět obě její zadní kola současně. To samozřejmě konstrukčně možné je, ale nastává zde problém při zatáčení. Skutečnost, že hnací kola mají společnou pevnou hnací hřídel, neumožňuje, aby se do zatáčky točilo každé kolo jinou rychlostí. V důsledku to pak znamená, že tříkolka nezatočí, ale dojde ke smýkání či prokluzu kol. Tříkolky jsou tak často poháněny pouze jedním kolem. Tato varianta má však také svá úskalí. Pohon jednoho kola způsobí, že tříkolka neustále táhne ke straně, na které je poháněné kolo, což v důsledku znamená, že při přímé jízdě musí být řídítka stále mírně natočena na opačnou stranu, než je poháněné kolo. Tyto nešvary je možné odstranit použitím diferenciálu, který v této práci navrhuji. Existují také šlapací čtyřkolky, tedy vozidla se čtyřmi koly poháněná šlapáním. Také u nich by bylo výhodné použití diferenciálu. Šlapací čtyřkolky jsou, však doménou spíše nadšenců pro alternativní způsoby cyklistiky, kteří si tato vozítka sami navrhnou a vylepšují. Cílem této práce je ovšem návrh diferenciálu pro tříkolku určenou seniorům do městského provozu, proto se v ní šlapacími čtyřkolkami nebudu vůbec zabývat. V dnešní době se diferenciály do sériově vyráběných tříkolek běžně montují a odstraňují tak hlavní nevýhodu, kvůli které mnoho lidí tříkolku jako dopravní prostředek zavrhl. Otevírá se tím nová možnost, jak cestovat na třech kolech bezpečně, elegantně a neprodukovat žádné toxické látky.



# 1 HISTORIE TŘÍKOLOVÉHO VOZIDLA POHÁNĚNÉHO LIDSKOU SILOU

Vznik tříkolky sahá hluboko do období vynálezu kola a poté všech možných vozíků. První přímá historická zmínka o tříkolovém vozítku se však odkazuje na rok 1655, kdy byl postaven první tříkolový invalidní vozík. Zhotovil si jej pro sebe německý hodinář Stephan Farffhler, který byl zdravotně postižený a nemohl chodit. Vozík byl tedy poháněn ručně pomocí dvou klik a mohl vézt pouze jednu osobu. Stephana Farffhlera tak lze považovat za prvního objevitele tříkolového vozítka, o kterém existuje přímá historická zmínka.[1]



*Obr. 1.1 Historicky první tříkolové vozítko [1]*

Francouzští vynálezci pak na konci 18. století vyvinuli první tříkolové zařízení, které bylo poháněno pedály. Tito vynálezci také pojmenovali tříkolové zařízení tak, jak ho známe i dnes tj. tříkolka případně trojkolka. Tříkolky byly nejvíce oblíbené a hojně používané v Anglii. V roce 1818 si britský vynálezce Denis Johnson nechal patentovat postup k navrhování tříkolky. Roku 1877 James Starley zkonstruoval tříkolku, která používala dvě malá kola na pravé straně a velké hnací kolo na levé straně. Síla od pedálů na kolo byla přenášena přes řetěz. Byla to první tříkolka na světě využívající řetězový převod.

Tento vynález zapříčinil popularitu tříkolek natolik, že koncem 19. století bylo v Anglii už přes 20 firem vyrábějící tříkolky. Na trhu bylo až 120 různých modelů. Roku 1882 se začala tato tříkolka vyrábět v provedení Tandem. Mohla tedy vézt až dvě osoby.



*Obr. 1.2 První tříkolka, která byla poháněná řetězem [2]*



*Obr. 1.3 První tříkolka s řidičkou a nákladem [19]*

Největšímu zájmu se tříkolky těšily u žen. Dámy v té době totiž nosily dlouhé volně plynoucí šaty, tudíž pro ně byla pohodlnější a bezpečnější tříkolka než bicykl. Tříkolku také využívali lidé s postižením pohybového aparátu popřípadě ti, kteří neudrželi stabilitu na bicyklech. Tříkolky se staly i symbolem dopravy za úplatu. Těmto tříkolkám se posléze začalo říkat „rikša“. Tříkolky nesloužily jenom pro přepravu osob, ale stále více se začaly používat i pro přepravu lehkých nákladů, k čemuž se využívají i v dnešní době. [1] [3]



*Obr. 1.4 První tříkolka v provedení Tandem [4]*

## 2 OBJASNĚNÍ ODBORNÝCH TERMÍNŮ

V oblasti vozidel poháněných silou lidí a zejména pak tříkolek existují určitá označení, která nejsou všeobecně známá. Tato kapitola objasňuje pojmy, o kterých se bude v této práci pojednávat.

### 2.1 HPV

Human Powered Vehicle - jedná se o mezinárodní označení vozidla, které je poháněno pouze lidskou silou. Pohon obstarávají nohy nebo ruce, popřípadě jejich kombinace. Toto označení zahrnuje všechna vozidla pohybující se po souši, po vodě nebo ve vzduchu. [18]

### 2.2 KONFIGURACE DELTA

Tříkolka se dvěma koly vzadu a jedním řídícím kolem vpředu. [3]

### 2.3 KONFIGURACE TADPOLE

Tříkolka s jedním kolem vzadu a dvěma koly vpředu. Tadpole je anglické slovo, které v překladu znamená pulec. [3]

### 2.4 PŘEVODNÍK

Převodníky se skládají z jednoho až tří řetězových kol, přenášejících pohyb šlapání na řetěz. Řetěz je nasazen na jednom z těchto kol a pomocí přesmykače jej lze za jízdy přesunout na vedlejší kolo, čímž dojde ke změně převodového poměru. Součástí převodníku bývá také klika, na kterou je připevněn samotný pedál. [28]



Obr. 2.1 Převodník Shimano s klikou [25]



## 2.5 PŘESMYKAČ

Slouží k přesunutí řetězu na převodníku z jednoho řetězového kola na druhé. Je ovládán pomocí lanka od řídítek.



*Obr. 2.2 Přesmykač Sramred [26]*

## 2.6 RECUMBENT TRICYCLES

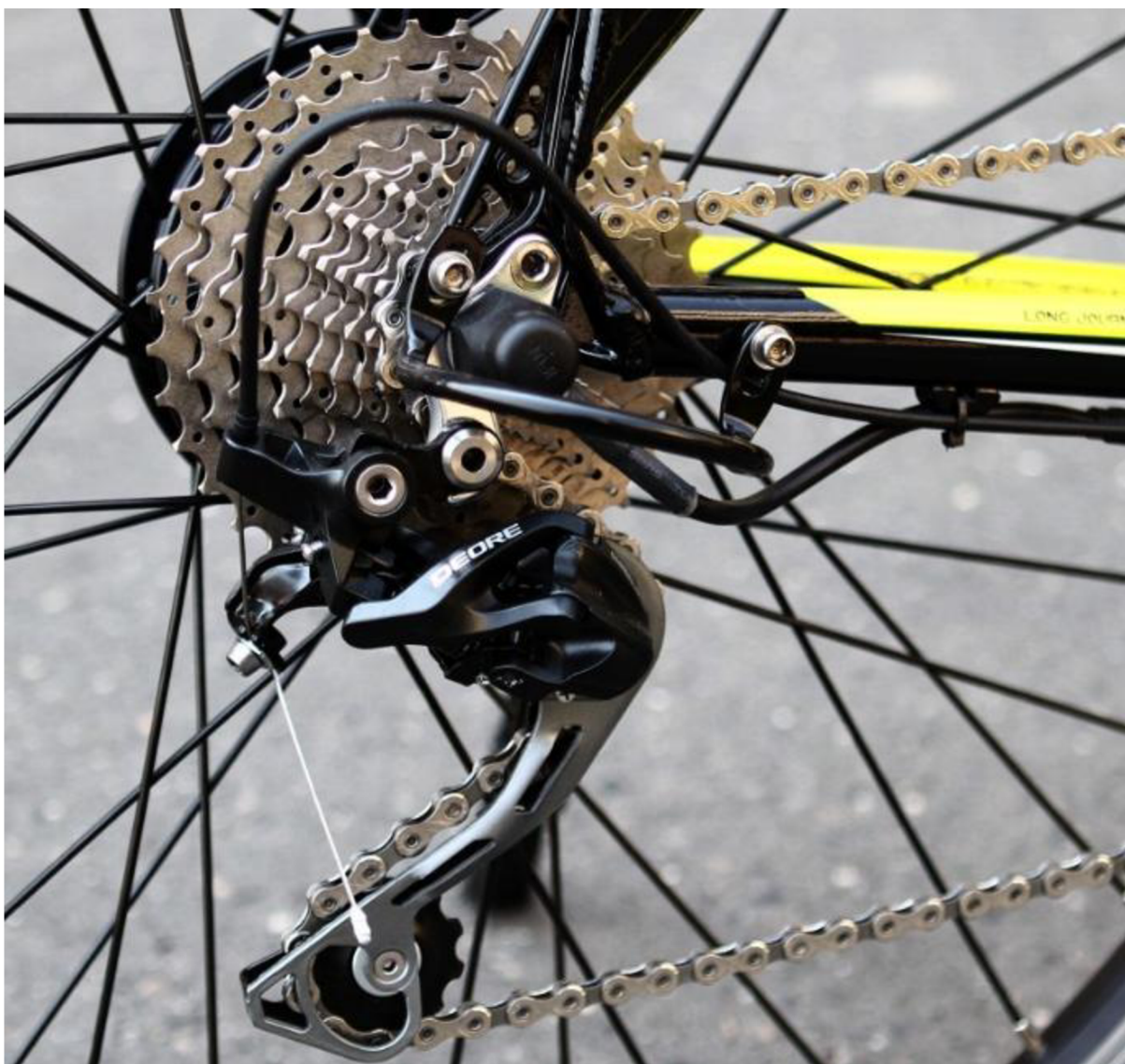
Recumbent tricycles nebo také recumbent trike je anglické označení tříkolky, která se od klasické tříkolky liší konstrukcí rámu a hlavně odlišnou pozicí při jízdě. Jezdec je velmi nízko nad vozovkou a při jízdě téměř leží. Odtud vznikl český název lehociped nebo lehotříkolka. I když není lehotříkolka normalizovaný název, budu jej vzhledem k přehlednosti práce pro tento typ vozítka používat. [3] [18]

## 2.7 RIKŠA

Je to druh dopravního prostředku, kdy je vozík vezoucí jednu nebo více osob poháněn lidskou silou. Člověk jde pěšky a táhne vozík. Označením rikša lze také označit vozík, který je tažen bicyklem, popřípadě je-li vozík pro cestující součástí tříkolky. V této práci je pod pojmem rikša myšlena poslední uvedená možnost, tedy tříkolka s řidičem a jedním nebo více místy pro cestující. [22]

## 2.8 PŘEHAZOVAČKA A KAZETY

Přehazovačka nebo také zadní měnič slouží k přehození na jiné ozubené kolo na kazetě. Kazeta, neboli tři až jedenáctikolečko (počet řetězových kol v kazetě), slouží pro jemnější změnu převodového poměru, které je schopen jezdec využít k optimálnímu poměru mezi rychlostí otáčení poháněného kola a šlapáním do pedálů. Počet koleček v kazetě se volí podle toho, pro jaký účel bude kolo využíváno. Nejčastěji se volí devítikolečko. [28]



*Obr. 2.3 Přehazovačka Deore s devítikolečkem [27]*

### 3 SOUČASNÉ KONSTRUKCE ŠLAPACÍCH TŘÍKOLEK

Tříkolky nejsou dnes používány tak hojně jako bicykly, i přesto se však těší velkému zájmu příznivců tří kol. Tříkolky jsou dnes využívány lidmi napříč věkovým i profesním spektrem. Od tříkolek pro děti, přes tříkolky pro dopravu osob nebo nákladu za účelem podnikání nebo aktivního odpočinku, až po nadšence pro radost z jízdy po třech kolech. Každý z těchto uživatelů tříkolky potřebuje pro svoji činnost více či méně odlišné druhy tříkolek. V následující kapitole jsou rozděleny tříkolky ze tří různých hledisek.

#### 3.1 ROZDĚLENÍ TŘÍKOLEK PODLE ROZMÍSTĚNÍ KOL

Rozmístění kol hraje u tříkolky podstatnou roli hlavně z hlediska její stability a ovladatelnosti. Existují dva typy. Typ Delta a typ Tadpole.

##### 3.1.1 TYP DELTA

Nejznámější a nejrozšířenější je typ Delta. Tato tříkolka má jedno přední kolo, které je řízeno řídítky. Nejčastěji se používá přímé, horní řízení, obdobně jako u bicyklu. Dále je osazena dvěma zadními koly, která jsou obvykle hnací. Tato konfigurace snižuje náklady na řízení, zároveň však znatelně snižuje boční stabilitu při jízdě v zatáčce, popřípadě při brzdění. Výhodou je snadná přeprava nákladů, protože v prostoru nad zadními koly vzniká dostatek místa, například pro drátěný koš. [5] [18]



Obr. 3.1 Tříkolka typu Delta [20]

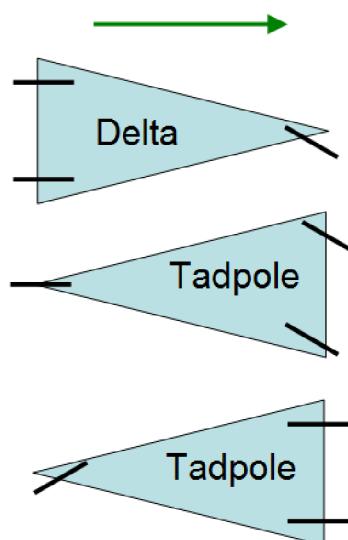


### 3.1.2 TYP TADPOLE

Typ Tadpole má dvě přední kola a jedno zadní. Většinou jsou řízena přední kola, která vyžadují složitější řízení s tlumičem rázů. Řízení je řešeno pomocí táhel a pák nebo je použito přímého řízení. Řízeno může být i zadní kolo, což ale zbytečně zvyšuje poloměr zatačení. Poháněno je téměř vždy zadní kolo, což umožňuje v případě potřeby jednoduché dodatečné umístění pohonné jednotky. Další výhodou je také zlepšení aerodynamických vlastností. Pomyslný tvar kapky, který tato konstrukce vytváří, umožňuje lepší obtékání vzduchu při jízdě, což znamená snížení odporu vzduchu. [5] [18] [1]



Obr. 3.2 Tříkolka typu Tadpole [7]



Obr. 3.3 Schéma různých konfigurací tříkolky [5]



## 3.2 ROZDĚLENÍ TŘÍKOLEK PODLE POLOHY TĚLA JEZDCE

Zde také existují dvě možnosti. Výběr rámu záleží hlavně na tom, pro jaké účely bude tříkolka primárně využívána.

### 3.2.1 RÁM PRO VZPŘÍMENÉHO JEZDCE

Poloha jezdce je stejná jako při jízdě na bicyklu. Rám tříkolky je také podobný jako u bicyklu. Pokud jde o typ Delta, pak je zadní část rámu rozvidlená, aby zadní kola poskytovala dostatečný rozchod pro stabilitu tříkolky. V případě typu Tadpole je naopak pro stabilitu tříkolky rozvidlená přední vidlice. [1]

### 3.2.2 RÁM PRO LEŽÍCÍHO JEZDCE - LEHOTŘÍKOLKA

Jezdec leží na sedadle, které je posazeno velmi nízko nad vozovku. Pedály jsou umístěny na rámu před ním a ve vyšší poloze než je sedadlo tak, aby se jezdci pohodlně šlapalo. Mezi výhody této polohy jezdce, oproti vzpřímené poloze, patří vyšší stabilita, nižší aerodynamický odpor a vyšší nosnost. Za nevýhody lze považovat vyšší pořizovací náklady, vyšší hmotnost a šířku tříkolky, velmi nízkou polohu sedadla, což není příznivé z hlediska vysedání ze tříkolky a v neposlední řadě také fakt, že jezdec se při jízdě do kopce nemůže na pedály postavit a využít tak ke šlapání celou svoji váhu, proto nezdolá takové stoupání jako u předešlého rámu. Tento rám je pohodlný i pro dlouhé jízdy. [1]



*Obr. 3.4 Lehotřikolka Tadpole [21]*

### 3.3 ROZDĚLENÍ TŘÍKOLEK PODLE ÚČELU POUŽITÍ

#### 3.3.1 TŘÍKOLKY NA PŘEPRAVU VÍCE OSOB - RIKŠA

Rikša se používá nejčastěji pro přepravu osob za úplatu v jižní a jihovýchodní Asii. Je to tříkolka s jedním kolem vpředu, kterým se zatáčí, a dvěma koly vzadu, které nesou jednoho nebo dva cestující. Začátkem 21. století se rikša stala populárním dopravním prostředkem pro zámožnější cestující ve velkých městech západní Evropy a v USA. Rikši zde fungují jako taxi nebo jako způsob, jak si v klidu a bez námahy prohlédnout město.



Obr. 3.5 Místní Rikša s řidičem ve městě Ninbho v Číně [9]



Obr. 3.6 Rikša na vyhlídkové jízdě u Vltavy [23]

Některé rikši mohou být vybaveny přístřeškem nad sedadly cestujících, popřípadě může být prostor pro cestující zcela uzavřen. Cestující jsou tak ochráněni před případným nepříznivým počasím. S ohledem na počet osob případně zavazadel, které rikša přepravuje, musí disponovat vyztuženým rámem a dalšími prvky pro bezpečnou jízdu, jako jsou například kotoučové brzdy, vícestupňová přehazovačka nebo ruční brzda s integrovanou parkovací brzdou. [1] [23] [10]

### 3.3.2 TŘÍKOLKY PRO PŘEPRAVU NÁKLADŮ

Tyto tříkolky mohou kromě jezdce samotného vézt také nějaký náklad nebo zavazadla. Tříkolka však musí mít, s ohledem na nosnost nákladu, vyztužený rám a podobně jako u rikši posílený brzdový účinek, parkovací brzdou, případně možnost pomocného elektrického pohonu pro zdolání většího stoupání. Místo, kam se náklad ukládá, musí být takové, aby nenarušovalo stabilitu a nebránilo výhledu jezdce na cestu. V případě konfigurace Delta je zavazadlový prostor umístěn mezi zadní kola pod sedadlo jezdce.



*Obr. 3.7 Tříkolka Delta s drátěným košíkem [11]*



U konfigurace Tadpole je místo pro náklad mezi předními koly. Plocha pro náklad může být například drátěný košík pro převoz nákupu, rovná pevná ložná plocha či otevřená nebo uzavřená krabice. Tyto tříkolky jsou velmi populární mezi drobnými živnostníky, kteří prodávají svoje zboží přímo na ulici. Patří mezi ně například prodejci zmrzliny, rychlého občerstvení nebo kávy. [1]



*Obr. 3.8 Tříkolka Tadpole pro přepravu nákladu [10]*

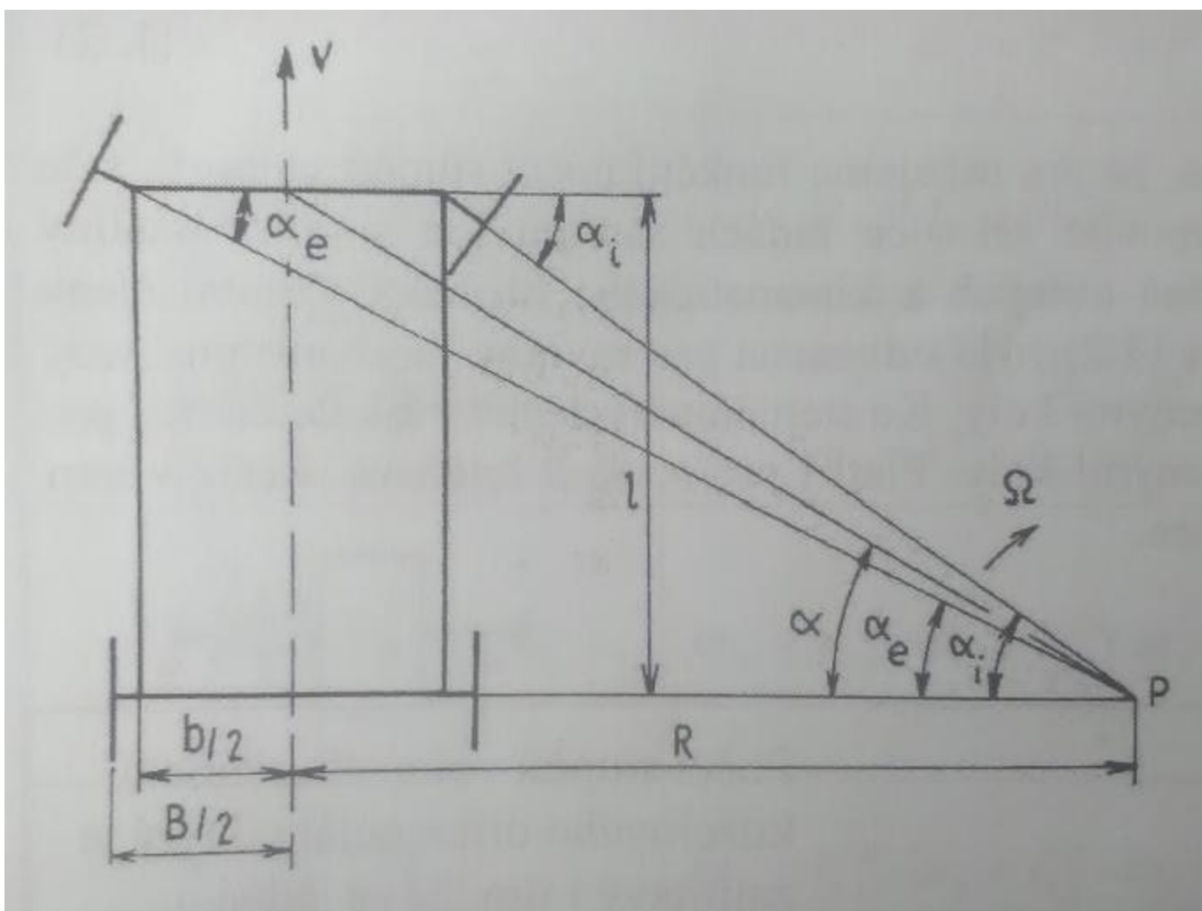


*Obr. 3.9 Tříkolka pojízdného stánku prodejce kávy [24]*

## 4 DIFERENCIÁL

Diferenciál je mechanické zařízení založené na principu planetové převodovky umožňující rozdílné otáčky hnacích kol vozidla a rovnoměrné rozložení točivého momentu na kola i v případě nestejných otáček. [12] [14]

Při průjezdu vozidla zatáčkou se vnější kola odvalují po kružnici o větším poloměru než kola vnitřní. To znamená, že ujetá dráha je u vnějšího kola delší než u vnitřního. Rozdílné poloměry kružnic, po kterých se kola odvalují, jsou dokumentovány na příkladu geometrické podmínky pro odvalování pneumatik bez skluzu, což je patrné z obrázku 4.1. [12] [13] [14]



Obr. 4.1 Rozdíl v poloměrech kol při průjezdu zatáčkou [14]

Pokud se jedná o nepoháněnou nápravu, kola nejsou spojena společným hřídelem, jsou volně otočná a mohou se otáčet různými otáčkami. Diferenciál zde není zapotřebí. U hnací nápravy bývají obě kola spojena hnacím hřídelem a mají tak stejné otáčky. Bez diferenciálu by se při průjezdu zatáčkou kola smýkala nebo odskakovala od vozovky.

K těmto nežádoucím vlivům však dochází nejen při průjezdu zatáčkou, ale také:

- při jízdě po nerovné vozovce
- při rozdílném zatížení kol
- při nestejném nahuštění pneumatik
- při rozdílném opotřebení pneumatik
- při odlišném dynamickém poloměru obou kol.

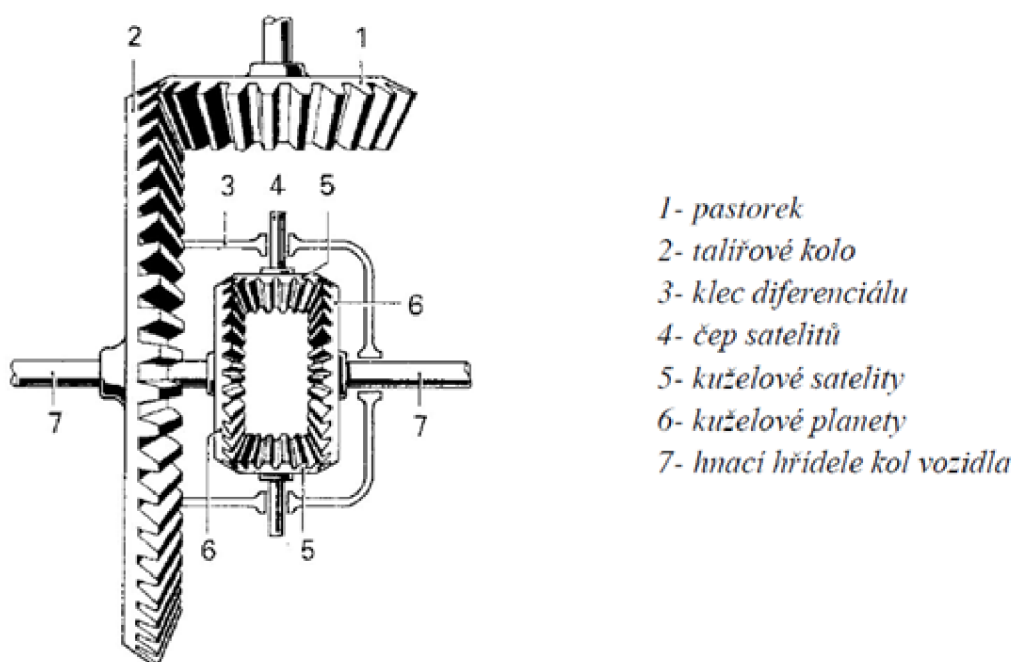
Smýkání nebo prokluz kol má pak za následek:

- zvýšené obvodové deformace pneumatik
- zhoršení bočního vedení pneumatiky
- zvýšené namáhání převodového ústrojí
- zvýšené namáhání všech částí, které spojují smýkající se kola
- zvýšení ztrát výkonu o část výkonu, která je vynaložena na smýkání a prokluz pneumatiky
- zvýšení ovládací síly řízení, pokud je jedná o řízenou nápravu

Z výše uvedených důvodů má dnes každý osobní automobil, nákladní automobil, autobus či traktor v rozvodovce zakomponovaný diferenciál. Nejčastěji se používají kuželové diferenciály, méně často pak čelní. [12] [13] [14]

## 4.1 KUŽELOVÝ DIFERENCIÁL

Na pastorek je přiváděn točivý moment od motoru. Pastorek je ve stálém záběru s talířovým kolem, které je pevně spojeno s klecí. Do klece je vložen čep, na kterém jsou otočně uložena dvě ozubená kola běžně označovaná jako satelity. V případě přenosu velkých točivých momentů, například u nákladních vozidel, je do klece vložen křížový čep a satelity jsou 4. Oba satelity jsou v přímém záběru s oběma centrálními koly. Každé centrální kolo je spojeno s hnacím hřídelem kola. [13]



Obr. 4.1 Kuželové soukolí s hypoidním ozubením a diferenciál s kuželovými koly [12]

### 4.1.1 PŘÍMÁ JÍZDA

Pokud jede vozidlo rovně, (úhel natočení volantu je nulový) jsou otáčky obou kol stejné a musí tedy platit:

$$\omega_l = \omega_p \quad (1)$$

$$n_l = n_p \quad (2)$$

$\omega_l$  - úhlová rychlost levého kola [rad/s]  
 $\omega_p$  - úhlová rychlost pravého kola [rad/s]  
 $n_l$  - otáčky levého kola [ $\text{min}^{-1}$ ]  
 $n_p$  - otáčky pravého kola [ $\text{min}^{-1}$ ]

Točivý moment je přenášený z pastorku na talířové kolo tzn. i na klec diferenciálu a satelity. Satelity se netočí kolem své osy, pouze obíhají v kleci kolem osy talířového kola. Centrální kola se točí stejnou úhlovou rychlostí jako klec a obě kola se tak točí stejnými otáčkami.

Zároveň je mezi ně rovnoměrně rozdělen točivý moment podle vztahu:

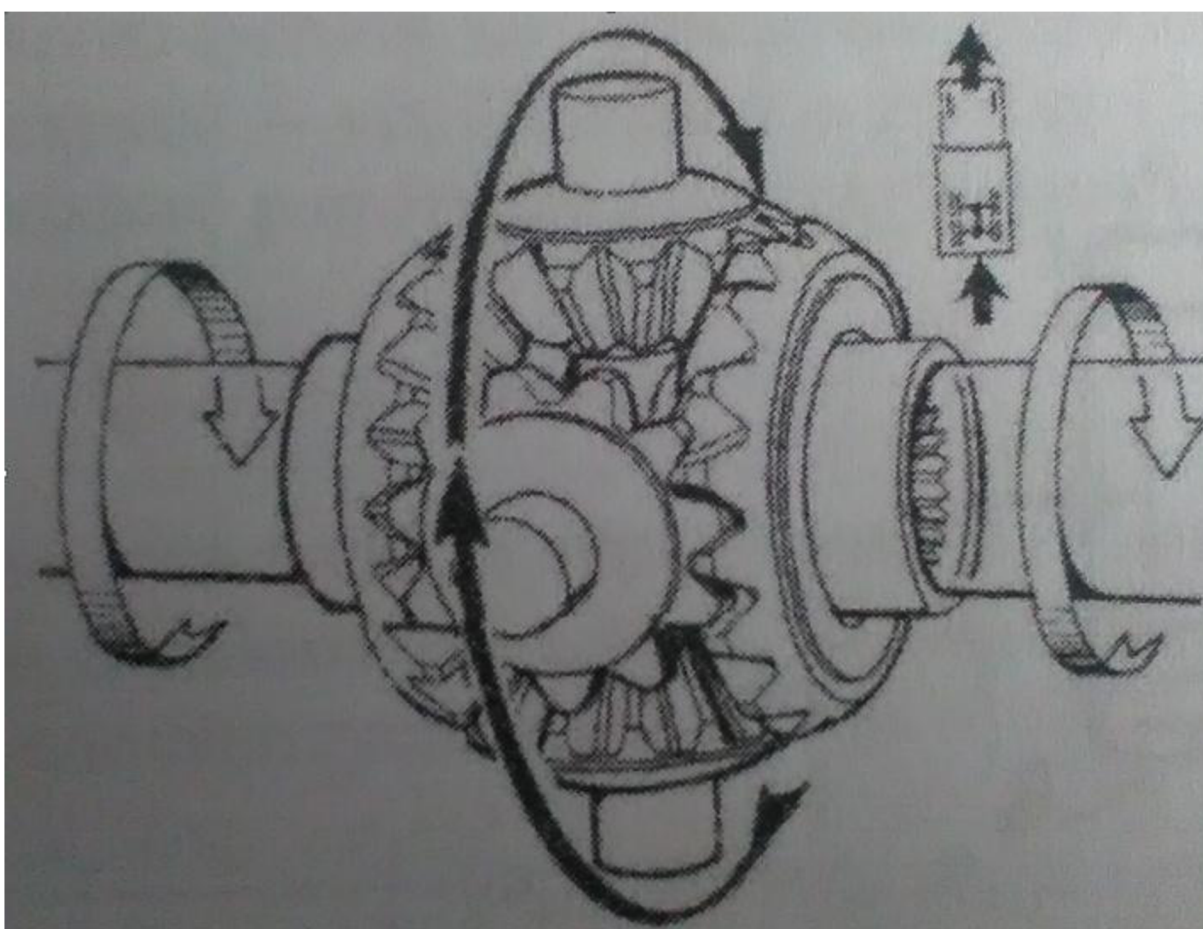
$$M_l = M_p \quad (3)$$

$$M_l + M_p = \frac{M_t}{2} \quad (4)$$

$M_l$  - točivý moment na levém kole [Nm]

$M_p$  - točivý moment na pravém kole [Nm]

$M_t$  - točivý moment přiváděný na klec diferenciálu [Nm] [12] [13]

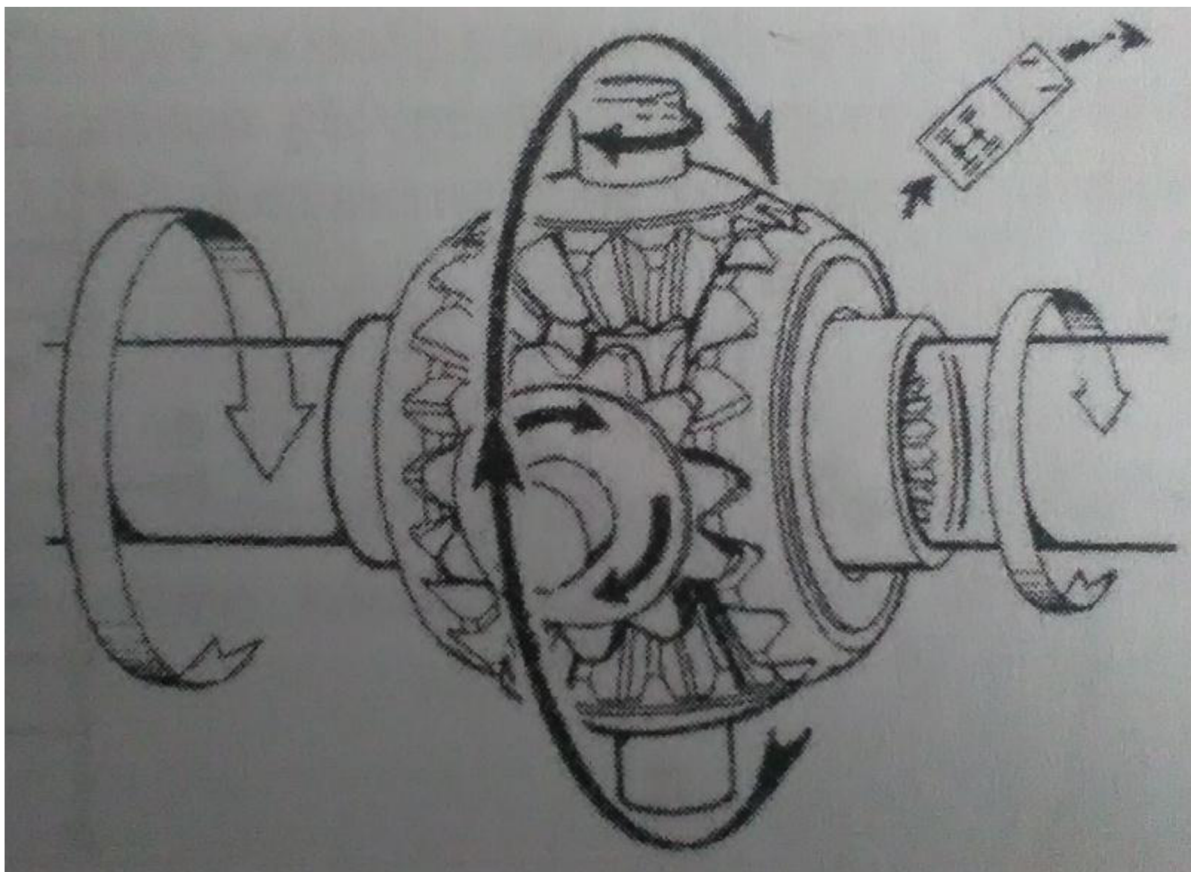


Obr. 4.2 Schéma kuželového diferenciálu při přímé jízdě [14]



#### 4.1.2 JÍZDA DO ZATÁČKY

Pokud vozidlo najede do zatáčky, dojde ke zpomalení vnitřního kola jedoucího po kratší dráze. Společně s ním se zpomalí i centrální kolo v diferenciálu, se kterým je kolo spojeno přes hnací hřídel. Satelity se začnou po zpomaleném centrálním kole otáčet, a zároveň tak urychlovat druhé centrální kolo, tudíž i druhé (vnější) hnací kolo odvalující se po větším poloměru. Satelity přitom vykonávají dva různé pohyby. Pohyb oběžný, kdy se stejně jako v případě přímé jízdy točí s klecí diferenciálu a navíc ještě pohyb otáčivý, kdy se otáčí na čepu kolem své vlastní osy. [13]



Obr. 4.3 Schéma kuželového diferenciálu při jízdě do pravotočivé zatáčky [14]

V tomto případě platí, že o kolik se zpomalí vnitřní kolo, o tolik se zrychlí vnější kolo podle vztahu:

$$n_k = \frac{n_l + n_p}{2} \quad (5)$$

$n_k$  - otáčky klece [ $\text{min}^{-1}$ ]

$n_l$  - otáčky levého kola [ $\text{min}^{-1}$ ]

$n_p$  - otáčky pravého kola [ $\text{min}^{-1}$ ] [13]

Pro zjištění úhlové rychlosti a obvodové rychlosti kol vycházíme z těchto vztahů:

$$\frac{v_l}{v_t} = \frac{R - \frac{a}{2}}{R} \quad (6)$$

$$\frac{v_p}{v_t} = \frac{R + \frac{a}{2}}{R} \quad (7)$$

$$\omega_l = \frac{v_l}{r_{dyn}} = v_t \times \frac{R - \frac{a}{2}}{R \times r_{dyn}} \quad (8)$$

$$\omega_p = \frac{v_p}{r_{dyn}} = v_t \times \frac{R + \frac{a}{2}}{R \times r_{dyn}} \quad (9)$$

$a$  - rozchod kol [m]

$r_{dyn}$  - dynamický poloměr kola [m]

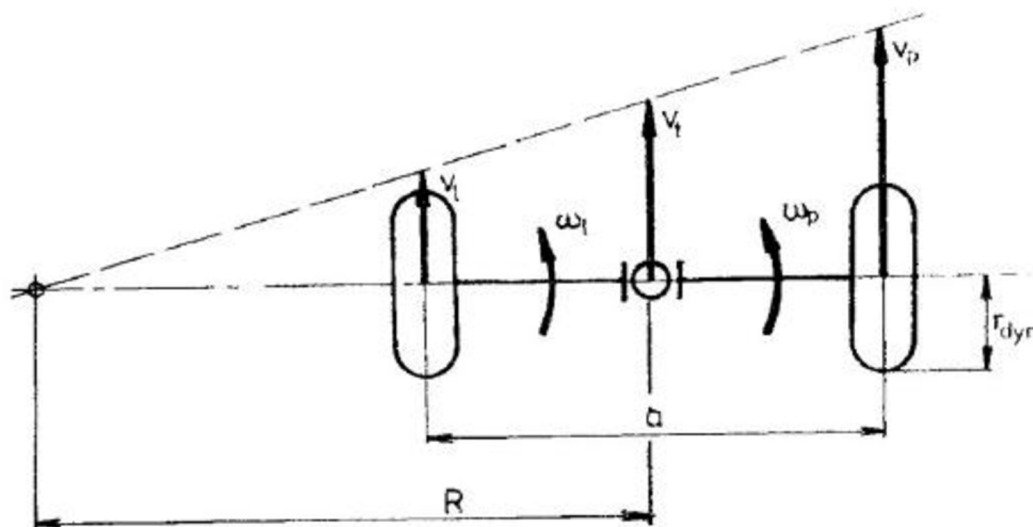
$R$  - poloměr kružnice opisující střed nápravy [m]

$v_t$  - rychlost středu nápravy [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$v_l$  - obvodová rychlost levého kola [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$v_p$  - obvodová rychlost pravého kola [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ] [12]

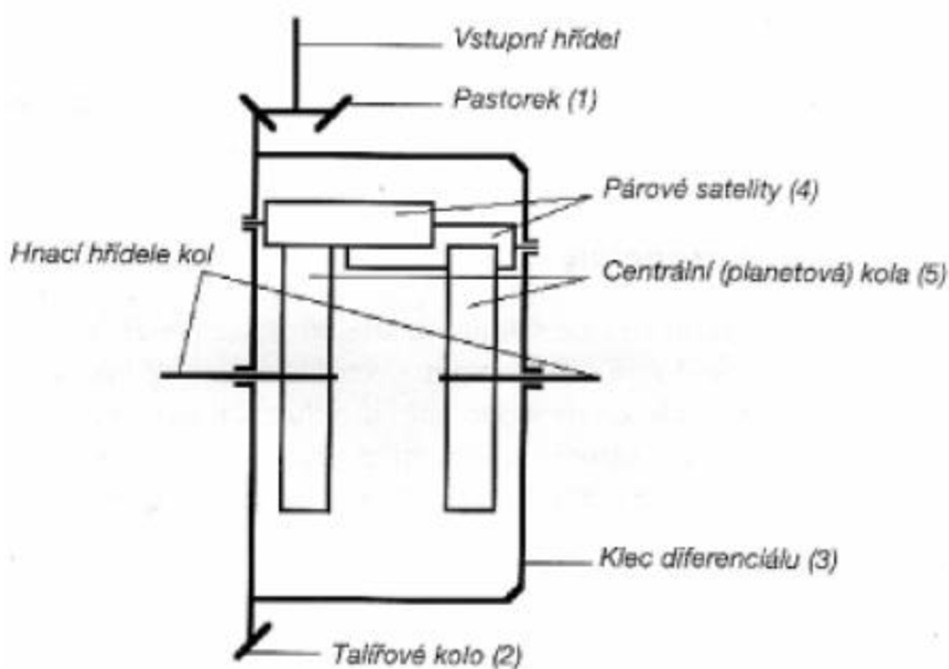
Vztahy pro výpočet úhlové a obvodové rychlosti jsou uvedeny pro vozidlo projíždějící levou zatáčkou, což je patrné z obrázku 4.4.



Obr. 4.4 Schéma úhlových rychlostí kol při průjezdu levou zatáčkou [12]

## 4.2 ČELNÍ DIFERENCIÁL

Čelní diferenciál je stejně jako kuželový tvořen pastorkem a talířovým kolem, na kterém je připevněna klec. V kleci jsou na čepích uloženy satelity s čelním ozubením. Bývají 4 nebo 6 podle velikosti přenášeného točivého momentu. Dále jsou zde uložena centrální kola s čelním ozubením, která jsou spojena s hnacími hřídeli kol, popřípadě náprav, jedná-li se o diferenciál mezinápravový. Rozdíl oproti kuželovému diferenciálu je v tom, že oba satelity nejsou v záběru s oběma centrálními koly, ale jedna polovina satelitu je vždy v záběru s jedním centrálním kolem a druhá s druhým satelitem, který je v záběru s druhým centrálním kolem. Princip činnosti je totožný jako u kuželového. Čelní diferenciály mají oproti kuželovým menší vnější průměr, ale jsou delší. [13]



Obr. 4.5 Schéma čelního diferenciálu [15]

## 5 DIFERENCIÁL PRO ŠLAPACÍ TŘÍKOLKY

Z předchozích dvou kapitol je zřejmé, jaké typy šlapacích tříkolek se dnes vyrábějí, a jaké výhody přináší použití diferenciálu u motorových vozidel. Na první pohled se může zdát, že tyto dvě věci nemají vůbec nic společného. Opak je ale pravdou. Použití diferenciálu není limitováno motorem ani výkonem. Jeho výhodné vlastnosti, které zabráňují smýkání kol při průjezdu zatáčkou, lze tedy úspěšně aplikovat i na vozítka poháněná lidskou silou. Diferenciál je vhodné použít pouze tehdy, pokud se jedná o koncepci, kde jsou z jednoho přívodu točivého momentu poháněna obě kola. Tříkolky s konfigurací kol Tadpole mají pouze jedno hnací kolo, proto zde žádný diferenciál nelze použít. U tříkolek s konfigurací kol Delta je ovšem použití diferenciálu žádoucí. Tříkolky byly původně vyráběny bez možnosti rozdělení hnacího momentu. Ten byl přenášen od pedálů přes řetěz na hřídel, která pevně spojuje obě zadní kola. V tomto případě není možné pohodlně změnit směr jízdy. Při zatočení předního kola dochází k jeho smýkání po vozovce. Ke smýkání dochází nejen u předního kola, ale také alespoň u jednoho ze zadních hnacích kol. Pokud se tříkolka pohybuje po povrchu s vyšším koeficientem tření (asfalt, beton), je pro jezdce jízda nepohodlná a nebezpečná. Další možností je pohánět pouze jedno kolo tříkolky. Tím se zamezí nebezpečnému smýkání kol. Nevýhodou však zůstává skutečnost, že při požadavku přímé jízdy musí být řídítka neustále mírně natočena na opačnou stranu, než na které je hnací kolo, abychom dosáhli přímé jízdy.

### 5.1 MOŽNOSTI ROZDĚLENÍ TOČIVÉHO MOMENTU

Výše uvedené nevýhody tedy vyžadovaly konstrukci, která nějakým způsobem rozdělí hnací moment na obě kola a zároveň nebude negativně ovlivňovat řízení a stabilitu tříkolky při jízdě. Jednou z možností jak tyto požadavky splnit, je použít diferenciál. Ten musí být upraven pro tříkolku velikostně i konstrukčně. Druhá možnost je využití vlastností volnoběžky.

#### 5.1.1 DIFERENCIÁL

Diferenciál pro tříkolku vychází z konstrukce kuželového diferenciálu motorových vozidel. Hlavním rozdílem je způsob přivedení točivého momentu na klec diferenciálu. Zatímco u diferenciálů motorových vozidel se moment přivádí stálým převodem, kde jsou v záběru pastorek a talířové kolo, u diferenciálů tříkolek je s klecí pevně spojeno ozubené řetězové kolo, jak lze vidět na obrázku 5.1.



Obr. 5.1 Diferenciál Samagaga DG72NJT [16]

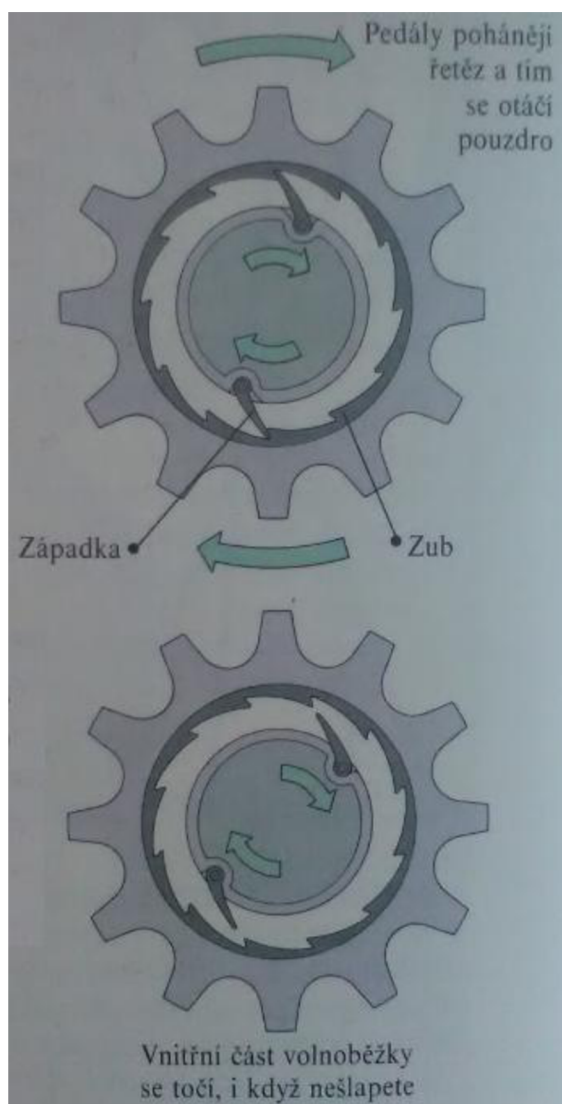
Točivý moment je tak přenášen od pedálu na diferenciál přes řetěz. Hlavní výhodou diferenciálu je rovnoměrné rozložení hnací síly na obě kola, čímž jsou méně (polovičním momentem) namáhány hnací hřídele a kola. Lze tak ušetřit hmotnost těchto dílů. Problém nastane, jakmile se jedno z kol dostane na povrch s nízkým součinitelem tření. Toto kolo ztratí schopnost přenášet sílu z obvodu kola na vozovku a zvýší se jeho otáčky. Ve stejném poměru, jakým diferenciál rozděljuje výstupní momenty, klesne hnací síla i na druhém kole stojícím na pevném povrchu. U motorových vozidel se tento problém řeší závěrem diferenciálu. Závěr se většinou u diferenciálů tříkolek nepoužívá kvůli zachování co nejnižší celkové hmotnosti vozítka a také proto, že k prokluzu, kvůli přenosu mnohem menších momentů než u motorových vozidel, dochází pouze zřídka. Problém s prokluzem jednoho z kol lze řešit i přibrzděním prokluzujícího kola nezávislou brzdou, která toto kolo zpomalí a částečně tím zvýší hnací sílu na prokluzujícím i stojícím kole. Tato možnost, která částečně nahrazuje funkci závěru, u tříkolek postačuje. Na obrázku 5.2 je diferenciál s možností použití přehazovačky s několika kazetami přímo na těle diferenciálu. Tato konstrukce vyžaduje pouze jeden hnací řetěz, což je výhodné z hlediska třecích ztrát. Za nevýhodu lze považovat větší délku diferenciálu prodlouženou o volnoběžku a náboj pro kazety. To může u mnoha konstrukčních řešení rámu tříkolek znamenat problém s umístěním diferenciálu. [14]



*Obr. 5.2 Diferenciál Samagaga DG72NCS [16]*

### 5.1.2 VOLNOBĚŽKA

Volnoběžkou, respektive dvěma volnoběžkami, lze u tříkolek docílit, stejně jako u diferenciálu, rozdílných otáček hnacích kol při jízdě do zatáčky. Výhodou oproti diferenciálu je nižší hmotnost dílů, jednoduchost a vyšší odolnost proti prokluzu kol, protože konstrukce volnoběžek neumožňuje prokluzování jednoho kola. Aby začalo jedno kolo prokluzovat, musí zároveň prokluzovat i to druhé. Nevýhodou je nutnost tuhé hnací hřídele, protože při jízdě na pevném povrchu působí hnací moment v podstatě pouze na jedno kolo. Další nevýhodou volnoběžek je neschopnost přenášet hnací moment v opačném směru, tedy v případě reverzního chodu. Teoretické konstrukční provedení zahrnuje jednu hnací hřídel osazenou jedním řetězovým kolem, na které je přes řetěz dodáván hnací moment od pedálů. Do náboje každého z kol jsou pak vloženy volnoběžky. Vnější část volnoběžky osazená zuby se točí s kolem. Vnitřní část se západkou se točí s hnacím hřídelem, a to pouze při šlapání. Schéma principu volnoběžky je zřejmé z obrázku 5.3.



Obr. 5.3 Schéma volnoběžky [17]



Reálně se volnoběžky neumísťují do nábojů, ale jsou použity dvě volnoběžky uprostřed a mají společnou vnější část opatřenou zuby. Ta je spojena s řetězovým kolem a je na ní přes řetěz přiváděn hnací moment. Na vnitřních koncích obou hnacích hřídelů jsou upevněny vnitřní části volnoběžky, tedy střed se západkami a ty jsou z každé strany nasazeny do vnější části volnoběžky. Pro lepší představu je tento způsob zobrazen na obrázku 5.4.



*Obr. 5.4 Rozdělení hnacího momentu pomocí volnoběžek [35]*

## 5.2 MOŽNOSTI PŘENOSU MOMENTU Z PEDÁLŮ NA DIFERENCIÁL

### 5.2.1 PŘENOS MOMENTU Z PEDÁLU PŘÍMO NA DIFERENCIÁL

Točivý moment je od pedálů přes převodník a řetěz veden přímo na diferenciál. Součástí diferenciálu je řetězové kolo, které je s klecí diferenciálu spojeno volnoběžkou. Volnoběžka je zde použita stejně jako u obyčejného bicyklu. Tedy proto, aby jezdec nemusel neustále šlapat, např. při jízdě z kopce, kdy využívá zemské přitažlivosti a setrvačnosti, a mohl mít pedály stále v konstantní poloze. Funkce volnoběžky je pak zřejmá z obrázku 5.3. Výhodou je zde použití pouze jednoho řetězu, což snižuje ztráty třením. Nevýhodou je, že při použití volnoběžky nelze brzdit šlapáním v opačném směru, ale každé kolo musí být opatřeno nezávislou brzdou. Další nevýhodou je také, s ohledem na konstrukci rámu tříkolky, omezený prostor pro diferenciál a přehazovací mechanismus. Proto se v tomto provedení častěji používá diferenciál s jedním řetězovým kolem bez přehazovačky jako na obrázku 5.4.



*Obr. 5.4 Přenos momentu z pedálu přímo na diferenciál [16]*



### 5.2.2 PŘENOS MOMENTU PŘES VLOŽENÝ NÁBOJ

První část pohonu je totožná s pohonem klasického bicyklu. Jezdec šlape a přenáší tak rotační pohyb z pedálů přes řetěz na náboj uchycený na zadní vidlici. Náboj je vybaven volnoběžkou a přehazovacím mechanismem. Na náboj však v případě tříkolky s diferencíálem není upevněn ráfek, ale řetězové kolo, které přes druhý řetěz pohání diferencíál. Nevýhodou je použití dvojice řetězu, což má za následek vyšší ztráty třením a vyšší hmotnost. Výhodou je větší prostor pro řešení mechanismu pro převod pohonu. Kromě klasického náboje s přehazovačkou je možné využít tzv. vícerychlostního náboje, který je znázorněn na obrázku 5.6. Vícerychlostní náboj dokáže pomocí lanka ovládaného od řídítek změnit aktuální převodový poměr i za klidu. Navíc poskytuje brzdění šlapáním v opačném směru, což nevyžaduje nutnost nezávislé brzdy na každém z hnacích kol. Obě tyto výhody jsou v městském provozu žádoucí.



*Obr. 5.6 Přenos momentu přes vložený vícerychlostní náboj [36]*

## 6 VSTUPNÍ PARAMETRY DIFERENCIÁLU

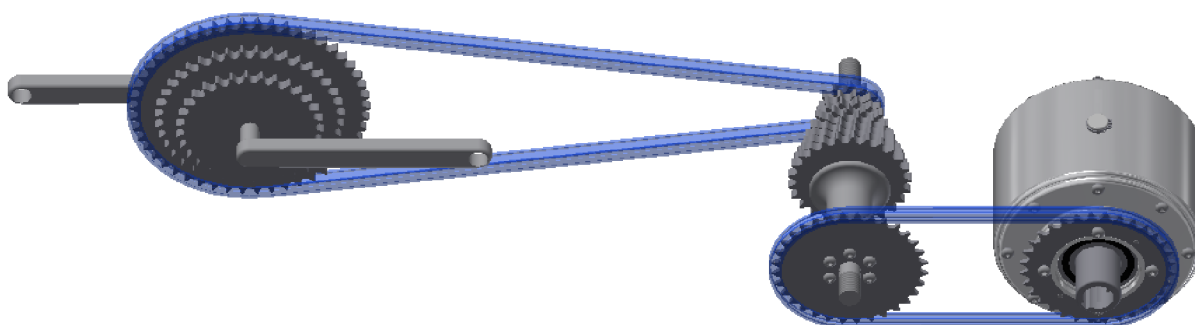
Úkolem mojí práce je zpracovat konstrukční návrh diferenciálu pro tříkolku poháněnou lidskou silou určenou zpravidla pro seniory a do městského provozu. Z dosud získaných poznatků o této problematice jsem se rozhodl navrhnout diferenciál tak, aby co nejvíce odpovídal požadavkům zadání, a proto jsem stanovil následující vstupní parametry:

- Diferenciál bude navrhnout pro tříkolku typu Delta s rámem pro vzpřímeného jezdce.
- Bude použit v tříkolce pro jednu dospělou osobu s možností lehkého nákladu v košíku nad zadními koly.
- Přenos hnacího momentu bude realizován přes vložený náboj, na kterém bude umístěno převodové ústrojí – přehazovačka.
- Na diferenciál bude hnací moment přiveden přes řetěz z vloženého náboje.
- Diferenciál bude vycházet z konstrukce kuželového diferenciálu.
- Bude vyroben za nízkých výrobních nákladů jako prototyp.

Volba tříkolky s konfigurací kol Delta byla vlastně jedinou možnou konfigurací, na které je účelné použít diferenciál. Opačnou konfiguraci, tedy Tadpole, nelze vybavit diferenciálem, jelikož má pouze jedno hnací kolo. Rám pro vzpřímeného jezdce jsem zvolil s ohledem na cílovou skupinu osob. Jsou to buď starší lidé nebo osoby s postižením pohybového aparátu, kterým se většinou špatně vstává z nízko položených míst. Tento rám zaručuje, že sedlo je v přibližně stejné výšce jako u klasického bicyklu, proto obava z problému při nasedání nebo vysedání není na místě. Mírně netradiční se může zdát použití dvou řetězů a vloženého náboje. Tento druh pohonu sice lehce zvýší hmotnost tříkolky a ztráty třením, ale bude zachována možnost změny převodového poměru společně s možností zakomponovat diferenciál i do tříkolek, u kterých není dostatek místa pro diferenciál, jehož součástí jsou i kazety s přehazovačkou. Volba mezi kuželovým a čelním diferenciálem byla poměrně jednoznačná a to z rozměrového hlediska. Kuželové diferenciály jsou oproti čelním užší, a právě požadavek na co nejmenší rozměr šířky, byl klíčový při výběru konstrukce diferenciálu. Protože jde o prototyp, budou pro výrobu diferenciálu použity běžně dostupné materiály a také standardní obráběcí operace.

## 7 NÁVRH PŘENOSU HNACÍHO MOMENTU OD PEDÁLŮ NA KOLA

Před konstrukcí samotného diferenciálu je nutné navrhnout pohon a převody tříkolky, aby bylo možné vypočítat maximální točivý moment, který se na diferenciálu může vyskytnout. Tato informace je důležitá zejména kvůli pevnostní kontrole jednotlivých částí diferenciálu. Zvolil jsem variantu přenosu hnacího momentu přes vložený náboj, jenž obsahuje kazety a přehazovačku. Samotný diferenciál tak pohání pouze jedno řetězové kolo a je možno jej použít i u tříkolek, které neposkytují dostatečný prostor pro diferenciál, jehož součástí by byly i kazety a přehazovačka. Variantu bez možnosti změny převodového poměru jsem nebral v potaz vzhledem k tomu, že tříkolka, kterou má být diferenciál vybavený, je určená pro starší uživatele. Schéma převodu je zobrazeno na obrázku 7.1. Maximální moment, který se na diferenciálu může vyskytnout, je 153,229 Nm. Tento výsledek jsem zaokrouhlil na 155 Nm a v dalších výpočtech беру v úvahu právě zaokrouhlenou hodnotu. Výpočet maximálního hnacího momentu, spolu s ostatními parametry (maximální hmotnost jezdce, délka kliky atd.) je k dispozici v příloze P1. Pro primární část převodu, včetně vloženého náboje, jsem použil díly, které jsou běžně k dispozici v obchodech s cyklistickými potřebami.



*Obr. 7.1 Schéma převodu s vloženým nábojem*

## 7.1 PŘEVODNÍK S KLIKOU

Vstupním článkem celého převodového ústrojí jsou parametry převodníku a kliky. Pro použití na tříkolce, která bude osazena mnou navrženým diferenciálem, volím převodník s klikou Shimano FC – M361. Jedná se o hliníkový trojpřevodník s počtem zubů 48/38/28. Délka kliky je 175 mm. [29]



*Obr. 7.2 Převodník s klikou Shimano FC – M361 [29]*

## 7.2 PRIMÁRNÍ ŘETĚZ

Pod pojmem primární řetěz je zde myšlen ten řetěz, který přenáší hnací moment z převodníku na kazety tak, jak je tomu u obyčejného bicyklu. Pro moji aplikaci volím řetěz Sram PC 830, který je složen ze 114 článků a používá se pro 7 nebo 8 rychlostní kazety a řazení. Spojení řetězu je realizováno pomocí rychlospojky viz obr. 7.3. [37]



*Obr. 7.3 Řetěz Sram PC 830 [37]*

### 7.3 PŘEHAZOVAČKA S KAZETAMI

Pro převod na vloženém náboji jsem zvolil kazetu CS - HG50 – 8. Kazeta obsahuje 8 ozubených koleček s rozsahem počtu zubů 12 až 25. Tento rozsah, spolu s rozsahem zubů na převodníku, zabezpečuje široké spektrum převodových poměrů pro všechny režimy jízdy. Pro přesun řetězu po kazetách byla vybrána přehazovačka Shimano Claris, RD-2400, 8s. [38] [39]



*Obr. 7.4 CS - HG50 – 8 [38]*



*Obr. 7.5 Přehazovačka Shimano Claris, RD-2400, 8s [39]*

## 7.4 VLOŽENÝ NÁBOJ

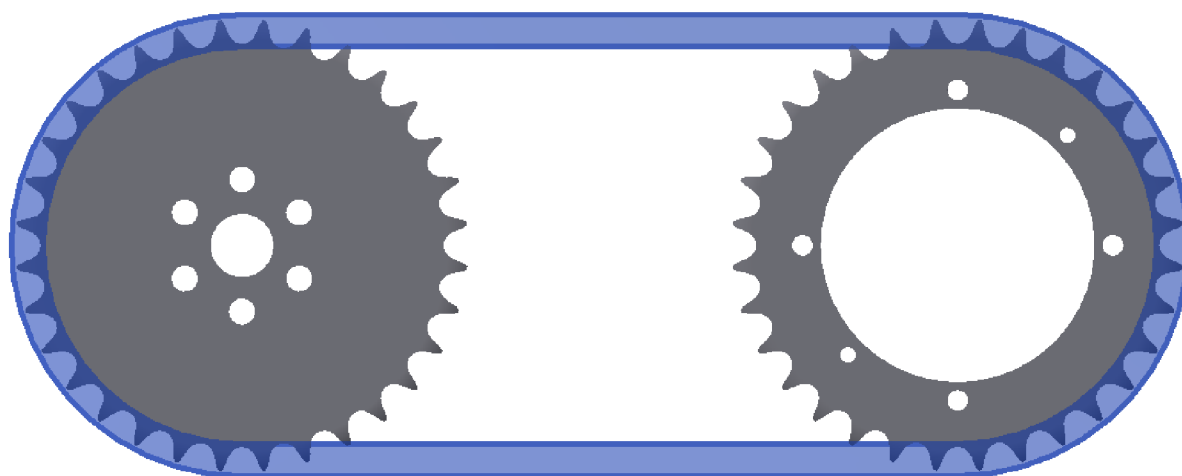
Funkci vloženého náboje bude v mém návrhu zastávat náboj Shimano FH-M475. Jedná se o zadní náboj, na který lze umístit 8, 9 nebo 10 kazet. Na náboj je také možné uchytit brzdový kotouč pomocí šesti šroubů. V mém návrhu bude na náboj místo brzdového kotouče upevněno řetězové kolo. Na tomto kole bude nasazen sekundární řetěz, který bude přenášet točivý moment na druhé řetězové kolo spojené s klecí diferenciálu. Absenci brzdového kotouče na náboji nahradí nezávislé kotoučové brzdy na každém z hnacích kol.



Obr. 7.6 Náboj Shimano FH-M475 [30]

## 7.5 SEKUNDÁRNÍ PŘEVOD

Sekundární část převodu tvoří hnací řetězové kolo přišroubované k náboji, sekundární řetěz a hnané řetězové kolo spojené s diferenciálem. Hnací řetězové kolo je opatřeno jedním středovým otvorem a šesti otvory, na roztečné kružnici pro šrouby, které ho pevně spojí s nábojem. Hnané řetězové kolo je k diferenciálu připevněno pomocí čtyř šroubů a dvou středících kolíků.



Obr. 7.7 Schéma sekundárního převodu

Převodový poměr mezi oběma koly je roven jedné, z čehož vyplývá, že vnější rozměry obou kol jsou totožné. Byl zvolen typ řetězu 05B-1-66 podle normy ČSN 02 3311. Jedná se o jednořadý, válečkový řetěz skládající se z 66 článků spojený pomocí rychlospojky. Parametry obou kol jsou uvedeny v tabulce 7.1 a parametry řetězu v tabulce 7.2.

*Tab. 7.1 Parametry řetězových kol*

Počet zubů	32
Šířka zubu	2,8 mm
Průměr roztečné kružnice	81,6 mm
Průměr hlavové kružnice	86 mm
Průměr válečku	5 mm
Osová vzdálenost kol	136 mm
Úhel otevření zubů	137,1°

*Tab. 7.2 Parametry sekundárního řetězu*

Počet řad	1
Rozteč	8 mm
Minimální vnitřní šířka	3 mm
Počet článků	66
Síla při přetržení	4400 N
Měrná hmotnost	0,2 kg/m



## 8 NÁVRH DIFERENCIÁLU

Jak již bylo avizováno ve vstupních parametrech návrhu, byl zvolen kuželový diferenciál. Hlavním důvodem je obecný fakt, že kuželové diferenciály mají menší rozměr celkové šířky než diferenciály s čelními ozubenými koly. Právě šířka diferenciálu zde hraje podstatnou roli, protože prostor pro umístění diferenciálu je relativně úzký. Z tohoto důvodu byl zvolen přenos momentu přes vložený náboj. Diferenciál je tedy osazen pouze jedním řetězovým kolem. Vzhledem k tomu, že se jedná o prototyp, případně kusovou výrobu, navrhnul jsem diferenciál tak, aby jeho výroba byla co nejlevnější a nejjednodušší.

Prvotní návrh se skládal z několika odlitek. Výroba formy pro odlévání by však byla velmi finančně náročná a vyplatila by se pouze v případě sériové výroby čítající několik tisíc kusů. V tomto návrhu bylo navíc hnací kolo uloženo uprostřed diferenciálu a jeho průměr by tak musel být větší, což s sebou neslo také mírné zvýšení celkové hmotnosti diferenciálu. Tuto variantu jsem tedy z výše uvedených důvodů opustil. Nicméně vzhledově je tato varianta, alespoň dle mého názoru, atraktivnější, jak je možno vidět na obrázku 8.1.



*Obr. 8.1 Prvotní návrh diferenciálu s odlitky*

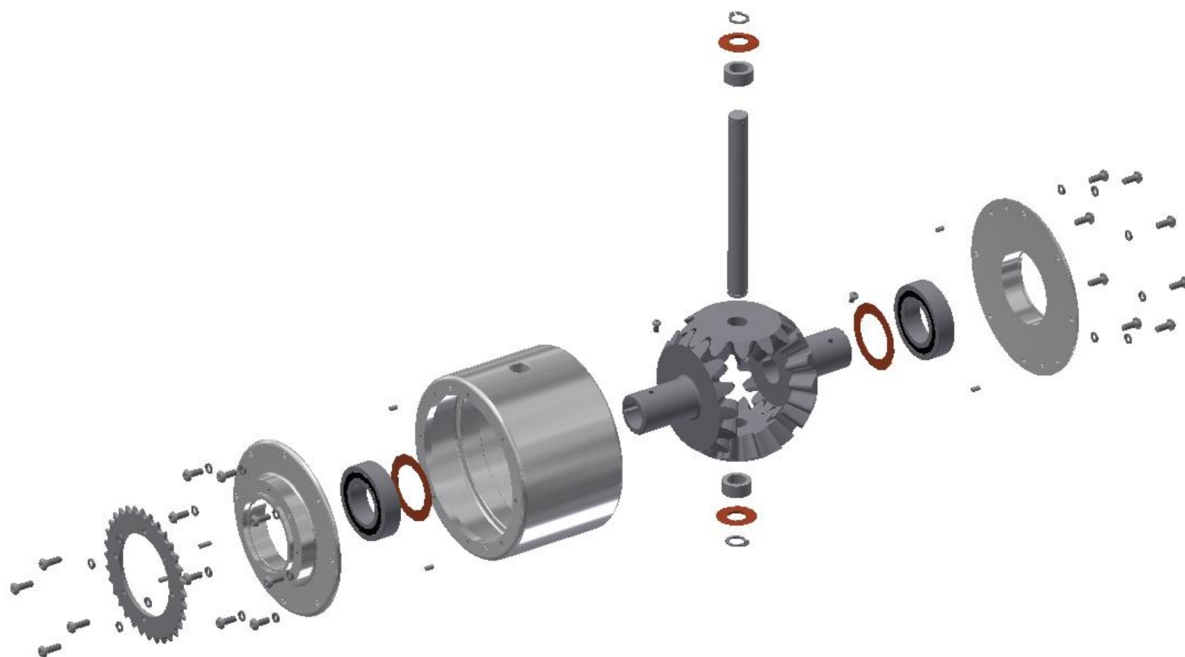


Finální návrh, zobrazen na obrázku 8.2, se tak skládá ze součástí, které byly vyrobeny z normalizovaných polotovarů, a to výhradně třískovým obráběním. Ozubená a řetězová kola jsou vyrobena frézováním a obrážením, ostatní součásti pak soustružením, řezáním, vrtáním a řezáním závitů. Klec a obě víka jsou vyrobena z hliníkové slitiny EN AW 2030, u které je zaručeno snadné třískové obrábění. Polotovar je kruhová tyč o průměru 115 mm. Tento materiál byl zvolen kromě dobré obrobitelnosti také proto, že se běžně dodává v požadovaném rozměru a tvaru. Nevýhodou použití této hliníkové slitiny je nevhodnost k eloxování. Ochranu proti korozi je tak nutné zajistit jiným způsobem, například nátěrem. Důležitou informací o diferenciálu jsou jeho vnější rozměry a hmotnost. Celková šířka diferenciálu je 151 mm. Tento rozměr zahrnuje i délky vyčnívajících trubek centrálních kol, které lze v závislosti na konkrétní aplikaci snadno upravit. Klíčovým parametrem, důležitým pro možnost použití diferenciálu do konkrétního rámu tříkolky, je šířka samotného diferenciálu. Jedná se o rozměr měřený od vrchní hrany šroubů řetězového kola po vnější hranu osazení protilehlého víka. Tato šířka činí 108 mm. Vnější průměr klece je 115 mm, ale vyčnívající středový čep na obou stranách klece zvyšuje v tomto místě maximální průměr na 122 mm. Celková hmotnost diferenciálu bez maziva je 2356 g.



*Obr. 8.2 Diferenciál*

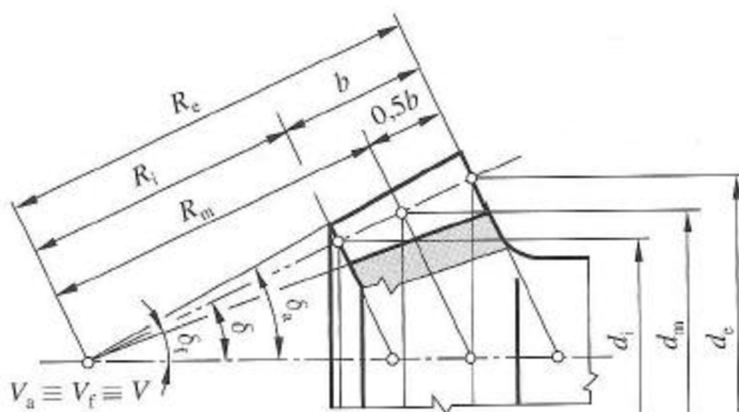
Na obrázku 8.3 je zobrazeno rozložení jednotlivých dílů, aby bylo zřejmé, kde se příslušné součásti vyskytují, případně s čím jsou spojeny. V příloze P4 jsou přiloženy výkresy sestavy a výrobní výkresy vybraných dílů.



*Obr. 8.3 Rozložený diferenciál*

## 8.1 KUŽELOVÉ SOUKOLÍ S ČEPEM

Rozdělení točivého momentu na obě hnací kola je zabezpečeno kuželovým soukolím. Skládá se ze dvou satelitů, uložených otočně na čepu a dvou centrálních kol, která jsou uložena v kuličkových ložiskách a pevně spojena s hnacími koly tříkolky. Jedná se o ozubení s přímými zuby. Tvar věnce zubu je znázorněn na obrázku 8.4. Pro tento tvar je typické, že roztečný, hlavový i patní kužel mají společný vrchol V, a příčné rozměry zubů lineárně narůstají se vzdáleností od tohoto vrcholu.



Obr. 8.4 Tvar věnce kuželových kol [31]

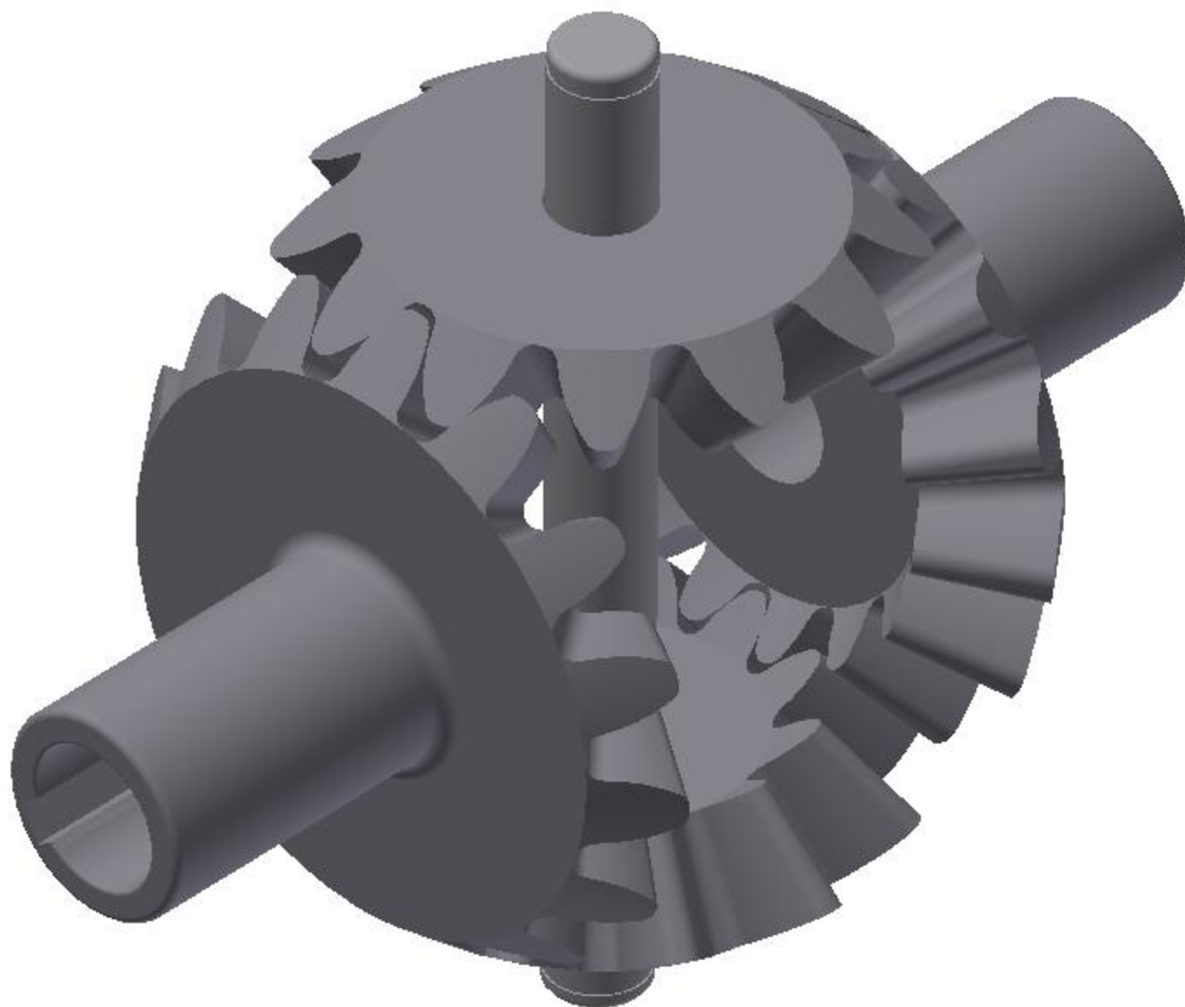
Pastorky i kola budou vyrobeny z oceli 12 061 frézováním, vrtáním a obrážením a následně budou zušlechťeny. Jejich technické parametry jsou uvedeny v tabulce 8.1. Čep je vyroben z konstrukční oceli 11 500. Polotovár pro soustružení je tyč kruhového průřezu. [31]

Tab. 8.1 Parametry kuželového soukolí [8]

Parametr	Pastorek	Kolo
Počet zubů	12	15
Šířka zubu	15 mm	15 mm
Střední roztečný průměr	50,6 mm	63,2 mm
Mez kluzu materiálu	440 MPa	440 MPa
Maximální hnací moment	155 Nm	155 Nm
Průměr díry pro hřídel	12 mm	17 mm

Točivý moment je přenášen z čepu na soukolí. Satelity jsou na čepu uloženy suvně, tedy s malou vůlí. Suvně je uložen i čep v kleci, aby jej bylo možné snadno vyjmout. Proti nežádoucímu vysunutí čepu z klece je čep opatřen na obou koncích drážkou, do které je po zasunutí čepu do klece nasazena pojistná podložka. Přenos momentu z centrálních kol diferenciálu na hnací hřídele kol tříkolky zajišťují těsná pera s šířkou i výškou 5 mm, podle normy ČSN 02 2507. V trubce každého z centrálních kol je vyvrtána díra se závitem M4, do které bude po nasazení hnacích hřídelí do diferenciálu našroubován šroub. Ten zajistí, aby nedocházelo k nežádoucímu axiálnímu posuvu diferenciálu v ose hnacích hřídelí, případně k úplnému vysunutí hřídele z diferenciálu.

U třikolek, kde je výše uvedeným nežádoucím pohybům zamezeno jiným způsobem, například tvarovým stykem, není tento šroub nutné použít. Kuželové soukolí s čepem je zobrazeno na obrázku 8.5.



*Obr. 8.5 Kuželové soukolí s čepem*

## 8.2 KLEC

Klec zde plní funkci unašeče satelitů a zároveň slouží jako skříň diferenciálu. Je vyrobena z kruhové tyče o průměru 115 mm. Na klec jsou kladeny požadavky na pevnost a zároveň na nízkou hmotnost, proto jsem pro její výrobu zvolil hliníkovou slitinu EN AW 2030 s mezí kluzu 250 MPa a hustotou 2800 kg/m<sup>3</sup>. Klec je uvnitř vysoustružena a z obou stran jsou ponechána čela, do kterých je z každé strany vyřezáno osm závitů M4 pomocí nichž budou ke kleci přišroubována víka. Pro vystředění vřel jsou na každém čele vyvrtány dva otvory o průměru 3 mm pro středící kolíky. V polovině klece je kolmo na osu rotace klece vyvrtán otvor pro čep satelitů. V místě otvoru je také ponechána větší tloušťka materiálu, aby nedocházelo k otlacení. Vnější průměr klece je 115 mm a šířka klece 74 mm. Vzhledem k nízké hustotě hliníkové slitiny a slabým stěnám disponuje klec hmotností 287 g. Model klece je znázorněn na obrázku 8.6.



*Obr. 8.6 Klec diferenciálu*



### 8.3 HNACÍ VÍKO

Funkcí tohoto víka je přenést točivý moment z řetězového kola na klec diferenciálu a zároveň uzavřít a utěsnit klec proti úniku maziva. Aby bylo možné víko pevně spojit s řetězovým kolem, je vnější část víka opatřena přírubou se čtyřmi závitmi M4 a dvěma otvory pro středící kolíky. Pro spojení víka s klecí je z vnitřní strany po obvodu víka zhotoveno 8 průchozích otvorů o průměru 4 mm, pomocí nichž bude víko přišroubováno ke kleci. Kvůli vystředění vůlí mezi oběma součástmi je víko opatřeno ještě dvěma neprůchozími otvory o průměru 3 mm, do kterých budou vloženy středící kolíky. Do vnitřního průměru víka je z vnitřní strany nalisováno ložisko. Aby bylo zabráněno jeho axiálnímu posuvu, je vnitřní průměr víka opatřen dorazem. Víko je vyrobeno ze stejného polotovaru i materiálu jako klec a pro dosažení jeho konečného tvaru je obráběno soustružením, vrtáním a řezáním závitů. Víko v konečné fázi dosahuje hmotnosti 125 g.



*Obr. 8.7 Hnací víko*

## 8.4 Víko

Víko slouží k uzavření klece z opačné strany, než ji uzavírá víko hnací. Pro uchycení ke kleci disponuje, stejně jako hnací víko, osmi otvory pro šrouby M4 a dvěma otvory pro středící kolíky po jeho obvodu. Ložisko je do vnitřního průměru víka nalisováno z vnitřní strany. Proti axiálnímu posuvu ložiska je vnitřní průměr víka opatřen dorazem. Materiál, polotovar i způsob obrábění je totožný s hnacím víkem. Hmotnost víka je 75 g.



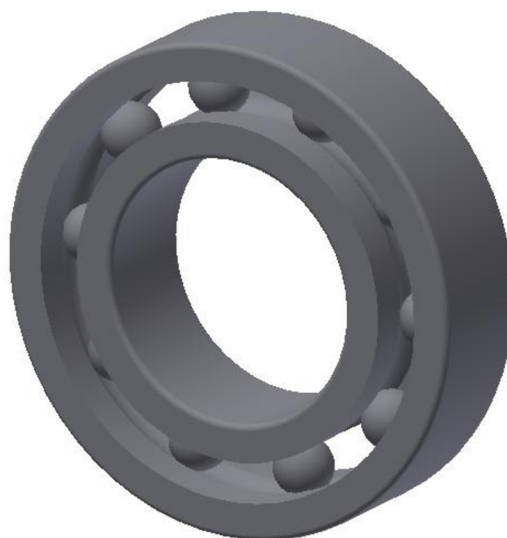
*Obr. 8.8 Vnější strana víka*



*Obr. 8.9 Vnitřní strana víka*

## 8.5 LOŽISKA

Pro přesné uložení centrálních ozubených kol jsou zde použita dvě valivá ložiska ČSN 02 4630 - 6005 2RS. Jedná se jednořadá kuličková ložiska s vnějším průměrem 47 mm, vnitřním průměrem 25 mm a šířkou 12 mm. Označení 2RS znamená, že je ložisko z obou stran opatřeno plastovým těsněním, aby bylo zabráněno úniku maziva a vniknutí nečistot do ložiska. Při výrobě jsou ložiska naplněna plastickým mazivem, které uvnitř vydrží po celou dobu životnosti ložiska, tudíž není nutné ložiska přimazávat. Tento typ ložisek jsem zvolil, kvůli jejich dobré únosnosti v radiálním i axiálním směru, která je v tomto případě žádoucí. Navíc jsou také oproti jiným typům valivých ložisek cenově dostupnější. Ložiska jsou na hřídelích ozubených kol i ve víkách uložena s mírným přesahem. [32] [33]



*Obr. 8.10 Ložisko 6005 bez plastového těsnění*

## 8.6 OSTATNÍ ČÁSTI DIFERENCIÁLU

Pro spojení jednotlivých částí diferenciálu a pro vymezení vůlí, případně zamezení posuvů jednotlivých součástí, je zapotřebí šroubů a různých podložek. Nezbytné je také šroubové spoje utěsnit, aby nedocházelo k úniku maziva. V této podkapitole jsou všechny tyto položky uvedeny a popsány.

### 8.6.1 ŠROUBY

Pro přišroubování vík ke kleci a řetězového kola ke hnacímu víku je použito celkem dvaceti šroubů M4 s plochou zaoblenou hlavou s vnitřním šestihranem a s délkami 10 a 12 mm, podle normy ČSN EN ISO 7380. Pro zajištění diferenciálu v jedné poloze je použito dvou šroubů téže normy, se závitem M4 a délkou 6 mm.

### 8.6.2 PRUŽNÉ PODLOŽKY

Všechny šrouby M4 jsou osazeny pružnými podložkami podle normy ČSN 02 1740. Použití pružných podložek bylo navrženo, aby nedošlo k nežádoucímu uvolnění šroubu za provozu.

### 8.6.3 POJISTNÉ KROUŽKY PRO HŘÍDEL

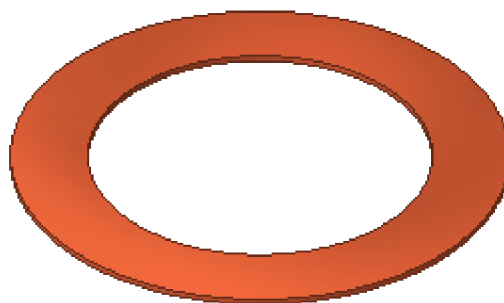
Aretaci čepu satelitů vsunutého do klece zajišťují na obou koncích pojistné kroužky pro hřídel podle normy ČSN 02 2930.

### 8.6.4 STŘEDICÍ KOLÍKY

Vzájemnou polohu jednotlivých komponentů zajišťují vždy dva středící kolíky. Při kompletaci diferenciálu je tedy použito šest středících čepů o průměru 3mm podle normy ISO 2340.

### 8.6.5 VYMEZOVACÍ PODLOŽKY CENTRÁLNÍCH KOL

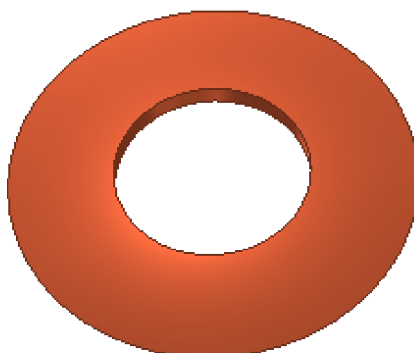
Aby nedošlo k dotyku víka diferenciálu s ozubením a jejich následnému poškození, je mezi obě součásti vložena podložka z materiálu s nízkým koeficientem tření. Zde je zvolena měděná podložka o šířce 0,5 mm. Počet podložek je závislý na přesnosti výroby a je tedy možné použít několik podložek vedle sebe.



*Obr. 8.11 Vymezovací podložka centrálních kol*

### 8.6.6 VYMEZOVACÍ PODLOŽKY SATELITŮ

U satelitů je nežádoucí, aby se axiálně posouvaly po čepu. Mohlo by tak dojít ke zmenšení záběrové plochy zubů, v extrémním případě až k rozpojení kuželového soukolí. Z těchto důvodů je na čep mezi satelit a klec navlečena vymezovací trubička a měděná podložka se zakulaceným tvarem, aby co nejlépe kopírovala tvar klece.



*Obr. 8.12 Vymezovací podložka satelitů*

### 8.6.7 TĚSNĚNÍ

Pro utěsnění případných výrobních nepřesností jsou před přišroubováním vík ke kleci, natřeny obě příruby klece vrstvou těsnicího tmele K161. Tento tmel je vhodný pro utěsnění úzkých přírub a těsnicích ploch s malými výstupními otvory, zároveň vyniká svoji chemickou odolností. [40]

## 8.7 MAZÁNÍ DIFERENCIÁLU

Pro správný chod ozubeného soukolí je nezbytné, aby se ozubená kola přímo nedotýkala a vzájemně se tak neodírala a neopotřebovávala. Z těchto důvodů jsou všechny ozubené převody mazány. Na povrchu každé součásti je tedy vytvořena souvislá vrstva maziva tak, aby pokryla celou součást a nedošlo v žádné oblasti k dotyku dvou součástí bez maziva. U automobilových diferenciálů se převážně používají převodové oleje. Vzhledem k tomu, že soukolí diferenciálu pro tříkolky je namáháno daleko méně než diferenciál automobilů, zvolil jsem pro jeho mazání plastické mazivo Shell Retinax HDX 2. Jedná se o speciálně vyvinuté mazivo pro automobilní aplikace s největším zatížením. Základem tohoto maziva je minerální olej a zahušťovadlo na bázi lithiového mýdla, což je dále doplněno vybranými vysokotlakými aditivami s přísadami proti opotřebení a antikorozními aditivami. Díky tomu lze použít i v aplikacích s rázovým zatížením. Dalším důvodem, proč nebyl použit olej, je nedostatečné utěsnění klece. Ložiska totiž nejsou doplněna gufery, ani jinými těsnicími prvky, takže by olej skrze ně mohl vytékat. Plastické mazivo zachovává svoji hustou konzistenci i za zvýšené teploty, proto k jeho únikům z klece nedochází. Objem maziva, kterým bude klec při kompletaci diferenciálu naplněna, není přesně znám. Odhadovaný objem je 300 ml. [6]

## 8.8 MONTÁŽNÍ POSTUP

Správný postup montáže je důležitý zejména kvůli zajištění správné funkce zařízení po jejím sestavení. V případě tohoto diferenciálu je nezbytné, aby byly správně vymezeny všechny vůle kuželového soukolí a aby byl diferenciál po jeho sestavení těsný a nedocházelo k úniku maziva.

Při montáži diferenciálu bude postup následující:

- 1) Klec postavíme na jednu z přírub a natočíme ji k sobě jedním z otvorů pro čep.
- 2) Vezmeme čep, nasadíme ho do otvoru a jednou třetinou ho zasuneme do klece.
- 3) Na čep zevnitř nasadíme měděnou podložku, která je z jedné strany zakulacená. Nasadíme ji tak, aby zakulacená strana mířila směrem ke kleci. Poté na čep nasadíme vymežovací trubičku a následně satelit tak, aby se čelo jeho širší průměru dotýkalo vymežovací trubičky. Čep si přitom zasuneme podle potřeby.
- 4) Nasadíme na čep druhý satelit, druhou vymežovací trubičku a druhou zakulacenou podložku tak, aby ležely vůči těm prvním zrcadlově s osou rotace klece.
- 5) Čep zasuneme celý do klece tak, aby z klece vyčnívaly pouze konce čepu s drážkami pro pojistný kroužek.
- 6) Do obou drážek pomocí kleští nasadíme pojistný kroužek pro hřídel.
- 7) Všechny komponenty uložené na čepu nasuneme doprostřed čepu a plastickým mazivem namažeme čep, zakulacené strany měděných podložek a vystoupanutou oblast klece, kde se jí tyto podložky dotýkají.
- 8) Pomocí lisu nebo obdobného zařízení nalisujeme do hnacího víka z jeho vnitřní strany ložisko. Ložisko musí být nalisováno kolmo na vnitřní hranu víka. Lisujeme až po doraz, aby hrana ložiska a hrana víka byly v jedné rovině.



- 9) Obdobně nalisujeme ložisko i do druhého víka.
- 10) Do hnacího víka nalisujeme nebo naklepeme kladivem dva středící kolíky z vnitřní strany pro vystředění víka vůči kleci a dva středící kolíky z vnější strany pro vystředění víka a řetězového kola.
- 11) U víka lisujeme pouze dva středící kolíky z vnitřní strany.
- 12) Na tělo centrálního kola nasadíme vymežovací podložku pro centrální kola.
- 13) Bod 12 zopakujeme i pro druhé centrální kolo.
- 14) Vnitřní kroužek ložiska zahřejeme například na vařiči, aby se vlivem teplotní roztažnosti zvětšil jeho vnitřní průměr a centrální kolo do něho šlo snadněji nasadit.
- 15) Do ložiska z vnitřní strany hnacího víka opatrně nalisujeme nebo naklepeme centrální kolo tak, aby vymežovací podložka byla mezi centrálním kolem a ložiskem otočná. Naklepnutí provádíme opatrně, buď gumovou paličkou, nebo obyčejným kladivem přes dřevo, lisování také přes dřevo, případně gumu, abychom přitom nepoškodili zuby centrálního kola.
- 16) Body 14 a 15 zopakujeme i pro druhé centrální kolo a druhé víko.
- 17) Klec položíme tak, aby čep ležel vodorovně. Satelity odsuneme od sebe až na doraz, aby do jejich záběru bylo možné vsunout centrální kolo.
- 18) Z jedné strany přiložíme ke kleci víko s centrálním kolem tak, aby středící kolíky vyčnívající z víka zapadly do děr o průměru 3 mm v přírubě klece. Kontrolujeme přitom, aby centrální kolo zapadlo správně do ozubení satelitů, případně se satelity pootočíme.
- 19) Přišroubujeme víko dvěma naproti sobě uloženými šrouby M4 s délkou závitu 10 mm osazenými pružnými podložkami a zkusíme centrálním kolem pootočit, zda správně zapadlo do ozubení satelitů. Centrální kolo se musí lehce otáčet a nesmí dřít o žádné části klece ani víka. Dále zkusíme, jestli nemá centrální kolo vůči satelitům přílišnou vůli. Pokud by bylo zřejmé, pohledem nebo ruční zkouškou, že centrální kolo nezabírá celou šířkou zubu nebo naopak, že je příliš natěsno se satelity a nelze s ním volně otáčet, je nutné vylisovat centrální kolo z ložiska a nahradit vymežovací podložku za širší nebo užší a celý proces zopakovat. Stejně tak je nezbytné upravit šířku vymežovacích trubiček satelitů, aby bylo zaručeno snadné otáčení satelitů.
- 20) Jakmile dosáhneme optimální vůle centrálního kola, odšroubujeme oba šrouby a odejmeme víko. Oblast vymežovací podložky centrálního kola důkladně namažeme plastickým mazivem.
- 21) Na přírubu klece nanese těsnící tmel v takovém množství, aby po dotažení šroubů příruby nedošlo k vytlačení tmele dovnitř diferenciálu. Pokud se po utažení šroubů objeví nějaký tmel na vnější straně, otřeme jej dosucha hadrem.
- 22) Poté víko opět nasadíme pomocí středících kolíků na klec a přišroubujeme víko osmi šrouby M4 s pružnými podložkami. Dotahujeme vždy dva šrouby proti sobě, aby plocha víka rovnoměrně dosedla na přírubu klece.
- 23) Nyní zbývající otevřenou stranou klece naplníme její vnitřek plastickým mazivem. Dbáme přitom na to, aby byly oba pastorky i centrální kolo po celém povrchu ozubení pokryty vrstvou plastického maziva, proto je vhodné s nimi během plnění pootáčet.
- 24) Bod 18 - 22 opakujeme při montáži hnacího víka. S tím rozdílem, že před finálním nasazením hnacího víka s ložiskem a centrálním kolem potřebe centrální kolo silnou vrstvou maziva.
- 25) Nakonec nasadíme řetězové kolo na středící kolíky hnacího víka a následně jej přišroubujeme čtyřmi šrouby M4 s délkou závitu 12 mm osazenými pružnými podložkami.

- 26) Po smontování diferenciálu pak zkusíme několikrát zatočit centrálními koly v obou směrech, aby se rozprostřelo mazivo uvnitř. Zároveň kontrolujeme, zda se některé z kol netočí s obtížemi, případně zda nedochází k nežádoucím akustickým projevům, které by predikovaly závadu uvnitř.
- 27) Po nasazení hnacích hřídelů tříkolky do diferenciálu našroubujeme šrouby M4 do závitů na trubkách centrálních kol. Tyto šrouby zamezí nežádoucímu axiálnímu posuvu diferenciálu v ose hnacích hřídelí, případně úplnému vysunutí hřídele z diferenciálu.

## 9 PEVNOSTNÍ KONTROLA

Před uvedením jakékoliv strojní součásti do výroby je nezbytné, aby byla provedena její pevnostní kontrola, ať už analyticky, nebo numericky, pomocí metody konečných prvků. Stejně tak je tomu i v případě tohoto diferenciálu. Pevnostní kontrola byla provedena u následujících součástí diferenciálu.

### 9.1 KUŽELOVÉ SOUKOLÍ

Kuželové soukolí bylo ověřeno z hlediska statické pevnosti. Bylo vyšetřeno, že nedojde jednorázovým působením největšího zatížení k trvalé deformaci nebo ke křehkému lomu povrchové vrstvy boku zubu v dotyku ani v ohybu. Tento výpočet byl proveden analyticky podle normy ČSN 01 4686 a je uveden v příloze P2. Koeficienty bezpečnosti pastorku i kola v dotyku a v ohybu jsou uvedeny v tabulce 9.1. Kontrolu únavové životnosti ozubení nebylo možno provést. Důvodem byl neznámý počet otáček soukolí a další skutečnosti. Klasické ozubené soukolí bývá obvykle navrženo, a zároveň i počítáno pro konkrétní jmenovité otáčky a tyto jsou pak dosazeny do příslušných vzorců pro výpočet únavy. Únava diferenciálního soukolí je však velmi odlišná. Počet zatěžujících cyklů je odvozen od rozdílů otáček poháněných částí a je velmi nízký (při přímé jízdě nulový). Je tedy málo pravděpodobné, že ke vzniku vyšších relativních otáček dojde při vysokém momentovém zatížení. Největší momentové zatížení však lze předpokládat při rozjezdu, kdy působí na zuby největší statické napětí. Statická bezpečnost je tedy v tomto případě důležitější. U automobilů se průměrné otáčky soukolí diferenciálu obvykle zjišťují experimentálně a to v několika jízdních režimech, např. městský provoz, mimoměstský provoz, dálnice apod. Tímto způsobem ale v případě mnou navrženého diferenciálu nelze postupovat, protože diferenciál ještě není vyroben. Soukolí bylo záměrně navrženo s určitou pevnostní rezervou, což mělo za následek vyšší koeficienty statické bezpečnosti. Lze tak předpokládat, že soukolí vydrží i z hlediska únavového namáhání. [34]

*Tab. 9.1 Koeficienty statické bezpečnosti*

Parametr	Pastorek	Kolo
Koeficient bezpečnosti v dotyku	1,62	1,98
Koeficient bezpečnosti v ohybu	4,23	5,29

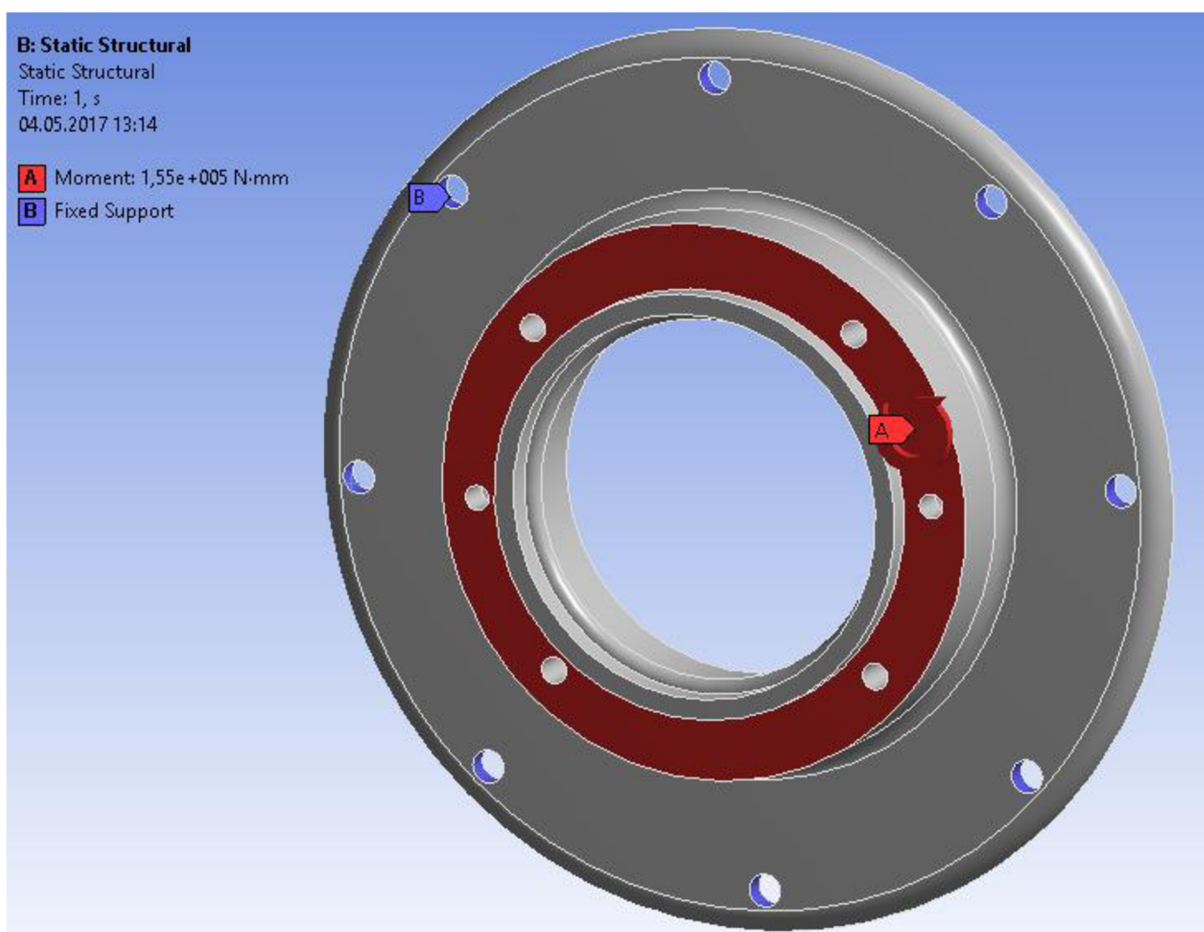
### 9.2 SEKUNDÁRNÍ ŘETĚZ

Řetěz byl ověřen analyticky, a to pouze z hlediska přetržení. Výpočet je uveden v příloze P3. Koeficient bezpečnosti proti přetržení řetězu je roven 1,16.

### 9.3 HNACÍ VÍKO

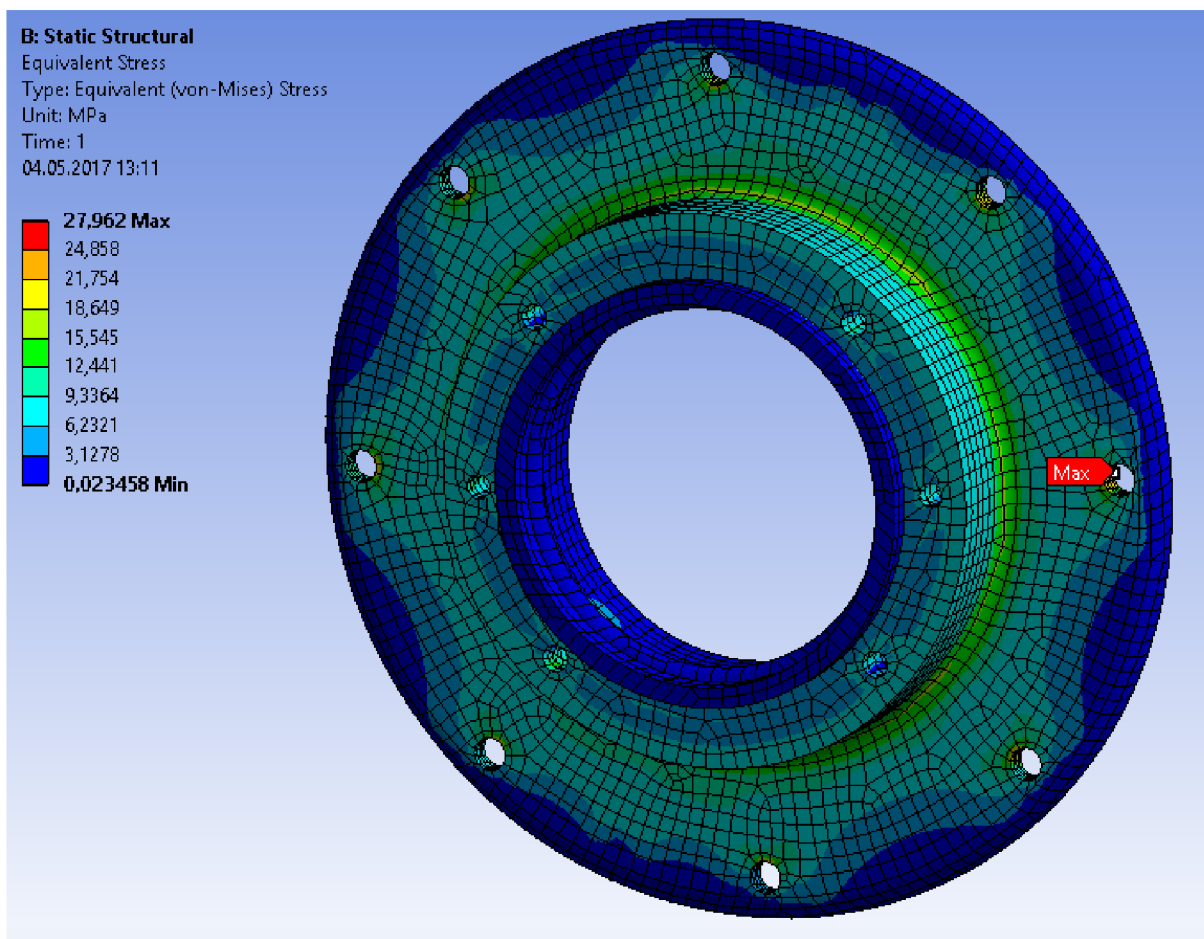
Pro kontrolu hnacího víka neexistuje žádná analytická metoda, proto bylo nutné použít k pevnostní kontrole metodu numerickou, konkrétně metodu konečných prvků. Kontrola byla provedena v programu Ansys Workbench 17.1. Do prostředí Workbench byl nahrán model z programu Autodesk Inventor Profesional, ve kterém byl model hnacího víka vytvořen. Následně byla po celém objemu víka vytvořena síť z prvků Hex Dominant o velikosti prvku 2 mm. U závitových otvorů a děr pro kolíky, které přenášejí točivý moment, byla síť zhuštěna na 1 mm. Vnější příruba víka byla zatížena maximálním hnacím momentem, tedy 155 Nm.

Všech 8 otvorů bylo opatřeno vazbou Fixed Support, která zamezuje posuvům i rotacím ve všech směrech. Víko v reálu drží osm předejpatých šroubů. Šrouby však nebyly v prostředí Workbench k dispozici, proto jsem pro kontrolu použil tento typ zavazbení. Nepředpokládá se však, že by toto zjednodušení výrazně ovlivnilo výsledek. Schéma zavazbeného víka je zřejmé z obrázku 9.1.



Obr. 9.1 Zavazbené víko

Rozložení napětí na víku je pak patrné z obrázku 9.2. Oblast maximálního napětí je v jednom z otvorů, kterými se víko upevňuje ke kleci, a je na obrázku označena červenou šipkou. Výpočet koeficientu bezpečnosti byl vypočten jako podíl meze kluzu materiálu EN AW 2030 a maximálního napětí vyskytujícího se na hnacím víku. Hodnoty maximálního napětí, meze kluzu materiálu a koeficientu bezpečnosti víka jsou uvedeny v tabulce 9.2



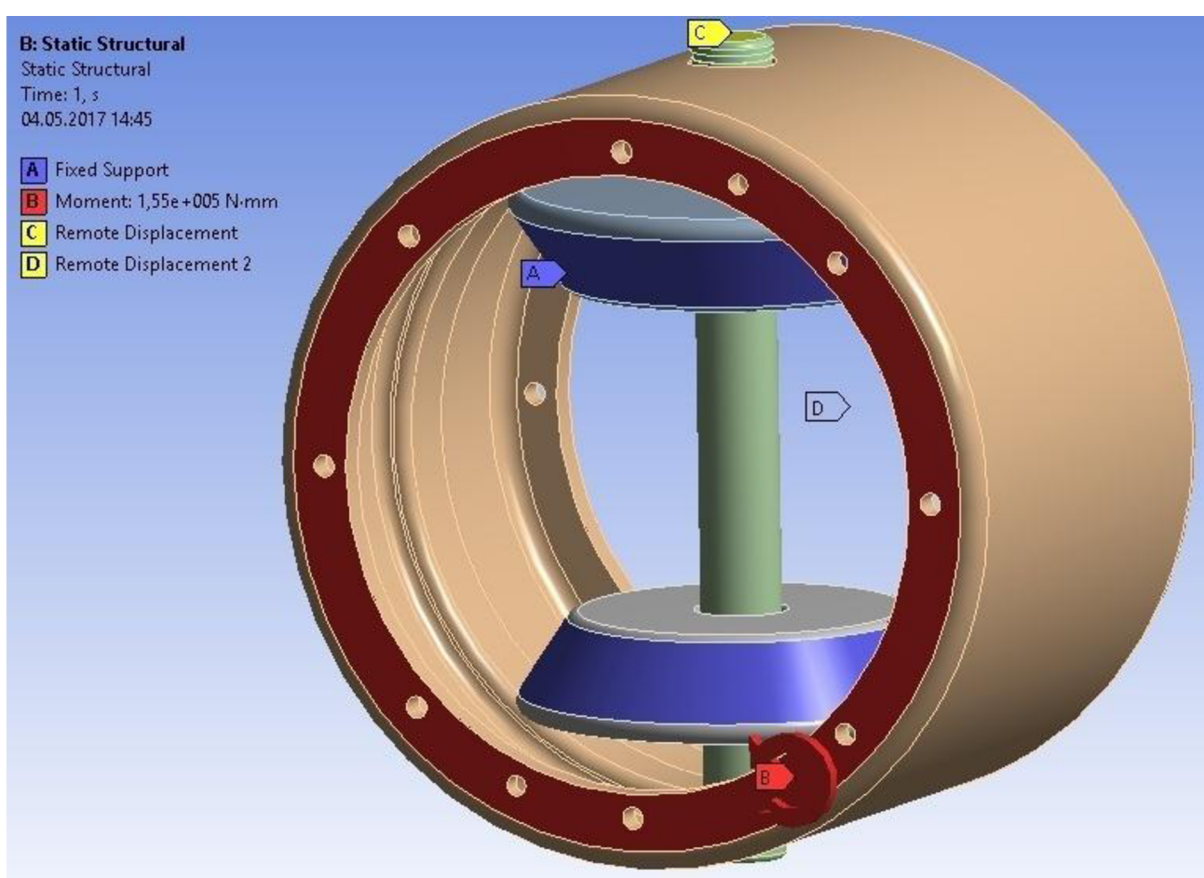
Obr. 9.2 Rozložení napětí na hnacím víku

Tab. 9.2 Tabulka hodnot hnacího víka [41]

Parametr	Hodnota
Mez kluzu EN AW 2030	250 MPa
Maximální napětí na víku	27,96 MPa
Koeficient bezpečnosti víka	8,94

## 9.4 KLEC A ČEP

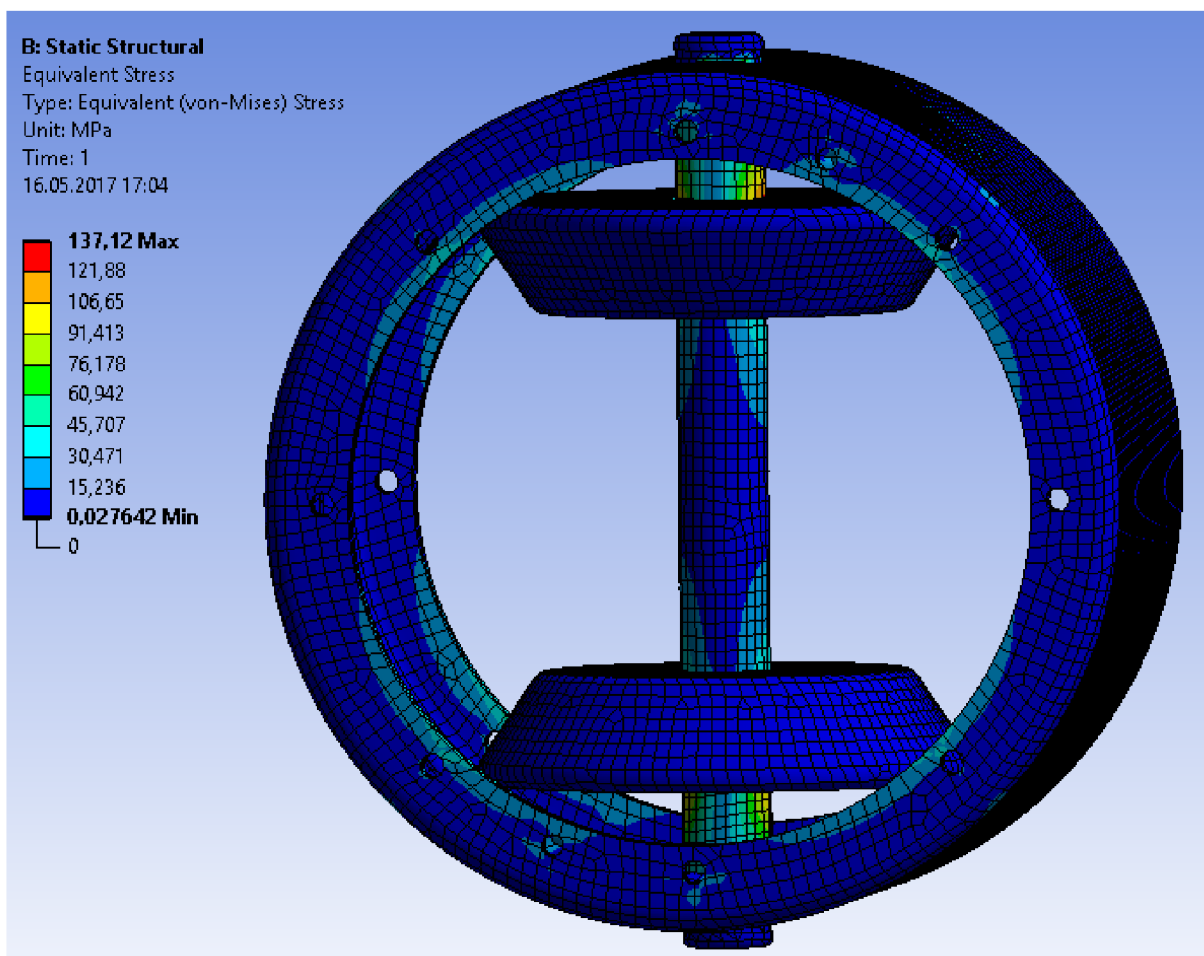
Pro pevnostní kontrolu těchto součástí bylo také použito prostředí Workbench. Ve snaze přiblížit namáhání klece a čepu co nejblíže realitě, byly tyto součásti ověřovány společně, přičemž na čep byly ještě umístěny makety satelitů, jež byly v místech ozubení opatřeny vazbou Fixed Support, tedy upevněny jako nepohyblivá v žádném směru. Maximální hnací moment byl pak přiveden na přírubu klece. Aby mohl program snadno počítat a výsledek byl věrohodný, bylo nutné opatřit sestavu ještě dvěma prvky zamezujícími pohyb. K tomu bylo použito vazby Remote Displacement, která umožňuje zamezit posuv či rotaci vzhledem ke zvolené ose souřadného systému. První z těchto vazeb byla použita na čelo čepu a zamezuje axiálnímu posuvu čepu v jeho ose a rotaci kolem jeho osy. Druhá byla aplikována na opačnou přírubu, než na kterou je přiveden hnací moment, a je zde zamezeno rotaci klece kolem osy čepu. Schéma sestavy opatřené všemi vazbami a hnacím momentem je na obrázku 9.3.



Obr. 9.3 Zatížení sestavy

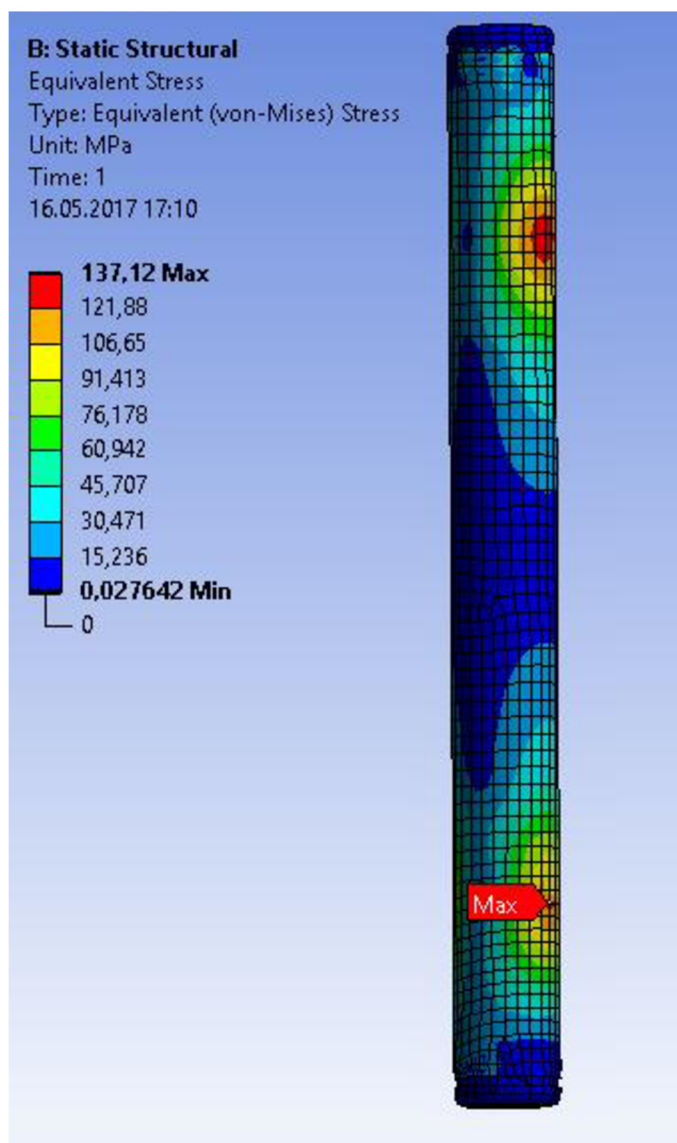


Na vytvoření sítě zde bylo použito prvku Hex Dominant o velikosti 2 mm. V oblastech, kde dochází k přenosu momentu z jedné součásti na druhou, byla síť zhuštěna, a to na velikost prvku 1 mm. Typ kontaktů byl nastaven na Frictional, tedy kontakt, který zahrnuje tření. Mezi styčné plochy klece a čepu byl nastaven koeficient tření 0,6. V tomto kontaktu totiž není uvažována přítomnost maziva. Koeficient tření v kontaktu styčných ploch čepu a satelitů byl nastaven na 0,1. Zde naopak uvažují, že jsou oba povrchy mazány, protože jsou uvnitř klece plné plastického maziva. Na obrázku 9.4 je sestava opatřena sítí a je zde vidět rozložení napětí na všech komponentech sestavy. Maximální napětí se vyskytuje na čepu. [42]



Obr. 9.4 Rozložení napětí na sestavě

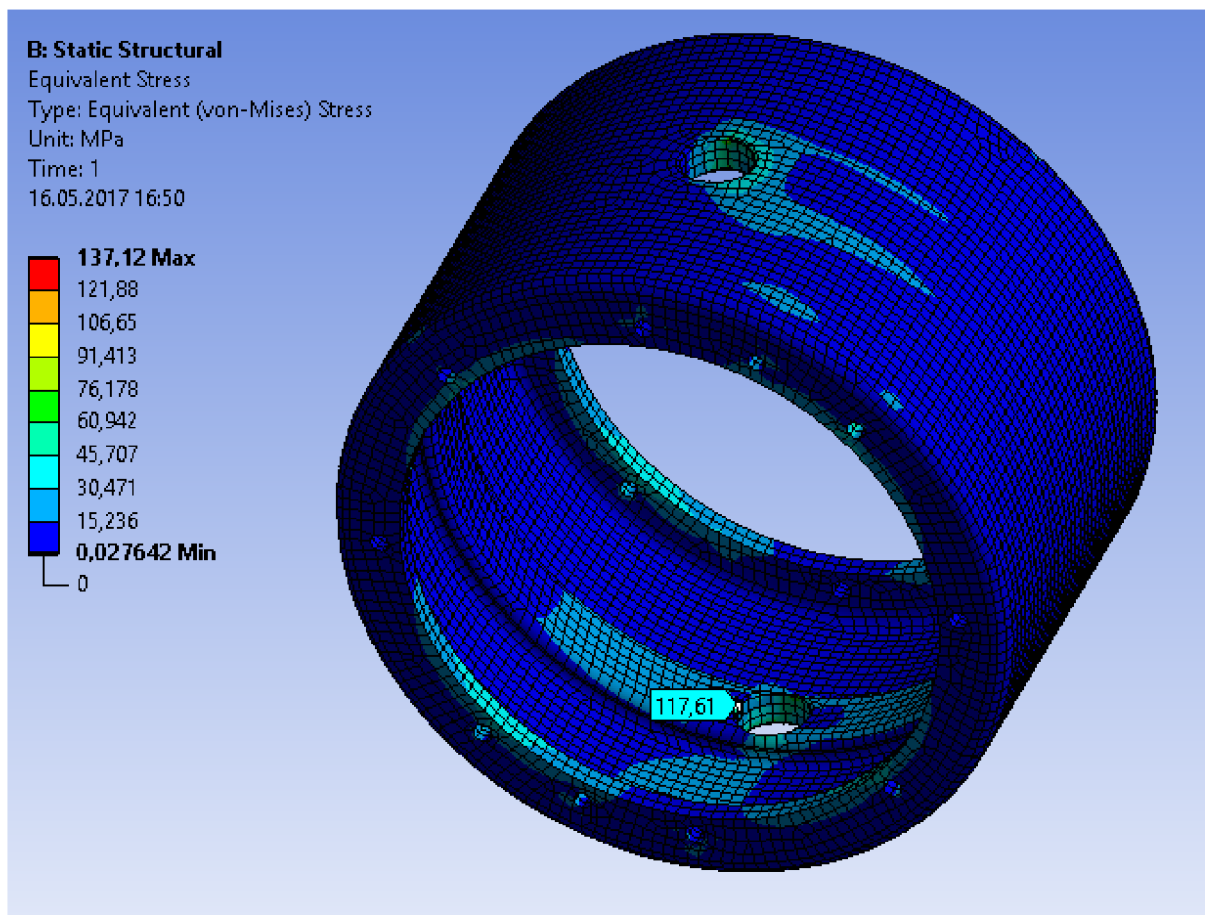
Na obrázku 9.5 je zobrazeno napětí na zatíženém čepu. Oblasti s maximálním napětím jsou v místech, kde se čep opírá o satelity, což bylo předpokládáno. Místo maximálního napětí 137 MPa označuje červená šipka.



Obr. 9.5 Rozložení napětí na čepu

Rozložení napětí na kleci je pak zřejmé z obrázku 9.6. Vzhledem k tomu, že maximální napětí je na čepu a na obrázku 9.6 je čep společně se satelity skrytý, zůstává zde rozsah s maximálním napětím 137 MPa. Na kleci se však takové napětí nevyskytuje. Maximální napětí klece udává sonda, která byla umístěna do oblasti s nejsvětlejší barvou, tedy s největším napětím a ukazuje hodnotu 117,6 MPa. Hodnoty maximálního napětí, meze kluzu materiálů a koeficientů bezpečnosti čepu i klece jsou uvedeny v tabulce 9.3.

Stejně jako u pevnostní kontroly kuželového soukolí, vychází i u součástí, ověřovaných metodou konečných prvků, vyšší koeficienty bezpečnosti. Byly totiž navrženy záměrně s určitou pevnostní rezervou, protože zavazbení, případně druh a způsob zatížení komponent v programu Ansys, nemusí vždy odpovídat reálným podmínkám.



*Obr. 9.6 Rozložení napětí na kleci*

*Tab. 9.3 Zatížení sestavy [41] [8]*

Parametr	Čep	Klec
Mez kluzu materiálu	265 MPa	250 MPa
Maximální napětí	137,1 MPa	117,6 MPa
Koeficient bezpečnosti	1,93	2,12

## 10 ZHODNOCENÍ

Diferenciály pro tříkolky vyrábí zatím jenom několik málo firem na světě. Všechny informace a zkušenosti týkající se této problematiky jsou proto veřejně nedostupné. Bylo tedy prakticky nemožné získat jakékoliv informace o zkušenostech při navrhování tvaru, designu nebo pevnosti jednotlivých dílů diferenciálu. Diferenciál je tedy navržen s ohledem na nízké výrobní náklady a s určitou rezervou v koeficientech bezpečnosti. Vzhledově by bylo možné diferenciál vylepšit použitím odlitků. Vzhledem k tomu, že se jedná o kusovou výrobu a formy pro odlévání jsou velmi finančně náročné, vyplatilo by se toto vylepšení pouze při sériové výrobě čítající několik tisíc kusů. Další variantou, jak zlevnit výrobu, by bylo použití komponentů, které se již sériově vyrábějí a používají v jiných aplikacích, například kuželové soukolí. Pro tento krok je však nutné mít patřičné zkušenosti v tomto odvětví, případně tomu musí předcházet pevnostní kontrola ozubených kol, aby bylo zajištěno, že odolají zátěži, na kterou nejsou primárně navrhnuty. Mechanická účinnost diferenciálu není přesně známa, ale odhaduje se na 85-90 %. Obecně lze říci, že tento návrh lze uvést do výroby bez obav z nefunkčnosti, případně z nedostatečné pevnosti jednotlivých komponentů. Zároveň je nutno dodat, že diferenciály, které jsou dnes běžně k dispozici, jsou značně propracovanější, méně robustnější a dosahují větší účinnosti.

## ZÁVĚR

Cílem této práce bylo navrhnout diferenciál pro tříkolku určenou starším uživatelům do městského provozu. Práce se skládá z několika kapitol. V první z nich je nastíněna historie a vývoj tříkolky od jejího vynálezu v roce 1655. Další kapitola objasňuje některé odborné termíny, týkající se vozidel poháněných lidskou silou, zejména pak tříkolek. Třetí kapitola rozděluje tříkolky hned z několika hledisek a poskytuje ucelený pohled na všechny typy tříkolek, které jsou dnes k dispozici. V dalších kapitolách řešební části je popsán princip diferenciálu používaný v motorových vozidlech a možnosti použití speciálních diferenciálů u šlapacích tříkolek i s variantami složení celého hnacího ústrojí tříkolky.

Stěžejní částí práce je pak samotný návrh diferenciálu. Požadavky byly kladeny zejména na jednoduchost, levné výrobní náklady, dostupnost použitých materiálů a co nejnížší hmotnost. Dále byla snaha, aby celková šířka diferenciálu byla co nejmenší, aby bylo možné diferenciálem osadit i tříkolky, které nemají dostatek prostoru mezi zadními vidlicemi. Z tohoto důvodu byl navržen přenos hnacího momentu přes vložený náboj, který umožňuje použití pouze jednoho ozubeného kola na diferenciálu, čímž se výrazně sníží šířka. Změnu převodového poměru pak zajišťuje přehazovačka s osmi kazetami, která je umístěná na vloženém náboji. Návrh klece čítal několik variant, z nichž jsem nakonec byla vybrána ta, která byla nejlevnější a nejméně náročná na výrobu. Ložiska, šrouby, pružné podložky, středící kolíky a pojistné podložky byly navrženy podle příslušných norem s rozměry, které jsou běžně dostupné. Pevnostní kontrola byla provedena u stěžejních komponentů diferenciálu. Koeficienty statické bezpečnosti jsou záměrně vyšší, protože součásti byly ověřovány pouze z hlediska statické bezpečnosti. Únavová bezpečnost nemohla být provedena vzhledem k neznámému počtu otáček soukolí. Počet zatěžujících cyklů je odvozen od rozdílů otáček poháněných částí a je velmi nízký (při přímé jízdě nulový). Je tedy málo pravděpodobné, že ke vzniku vyšších relativních otáček dojde při vysokém momentovém zatížení. S ohledem na tento fakt lze předpokládat, že součásti vydrží i z hlediska únavového namáhání. Vypracování diplomové práce s tímto tématem pro mne bylo velice zajímavé a poučné. Mohl jsem díky tomu nahlédnout hlouběji do problematiky cyklistiky a vytvořit tak práci na téma, které ještě nikdo přede mnou nevypracoval. Zároveň jsem si více osvojil ovládání programu Autodesk Inventor a Ansys Workbench.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Tricycle. *Wikipedia* [online]. San Francisco, 2017 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Tricycle>
- [2] Advertisement for a Rudge Coventry Rotary Tandem Tricycle. *Allposters* [online]. Los Angeles [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: [http://www.allposters.com/-sp/Advertisement-for-a-Rudge-Coventry-Rotary-Tandem-Tricycle-Posters\\_i6846199\\_.htm?ac=true](http://www.allposters.com/-sp/Advertisement-for-a-Rudge-Coventry-Rotary-Tandem-Tricycle-Posters_i6846199_.htm?ac=true)
- [3] Tricycle History, Facts and Types. *Bicyclehistory* [online]. ©2017 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://www.bicyclehistory.net/bicycle-history/history-of-tricycle/>
- [4] Charlie & Paul Farren on 1882 Rudge Rotary Tandem Tricycle. *ABC* [online]. Sydney, ©2016 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://www.abc.net.au/radionational/programs/lifematters/charlie-26-paul-farren-on-1882-rudge-rotary-tandem-tricycle-ou/6030254>
- [5] Three-wheeler. *Wikipedia* [online]. San Francisco, 2017 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Three-wheeler>
- [6] Shell Retinax HDX 2. *OlejeCZ* [online]. Brno, ©2017 [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <https://www.oleje.cz/p/shell-retinax-hdx-2-400-g--18964>
- [7] Tříkolky pro dospělé. *Meta Plzeň* [online]. Plzeň: ANTEE, ©2017 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://www.metaplzen.cz/index.php?nid=8092&lid=cs&oid=1524416>
- [8] ČSN 01 4686. *Pevnostní výpočet čelních a kuželových ozubených kol. 2*. Praha: ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 1989.
- [9] Místní rikša. *Foto franta* [online]. 2017 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://www.fotofranta.cz/fotoalbum/cestopisy/cina---ningbo/17-mistni-riksha-ceka-kseft--mame-ale-sveho-sofera.html>
- [10] H/box+30. *Transportrad* [online]. Rostock, 2013 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://www.transportrad-mv.de/hbox-30.html>
- [11] Elektrická tříkolka Apache. *Skútry pro seniory* [online]. Ostrava, 2017 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://www.skutry-pro-seniory.cz/Elektricka-trikolka-Apache-Etrik-20-3-rychlostni-nova-d578.htm?tab=description>
- [12] VLK, František. *Převody motorových vozidel. 1*. Brno: Vutium, 2006, 371 s. ISBN 80-239-6463-1.
- [13] JAN, Zdeněk, Bronislav ŽDÁNSKÝ a Jiří ČUPERA. *Automobily 2: Převody. 2*. Brno: Avid, 2008, 144 s. ISBN 978-80-87143-12-4.
- [14] ACHTENOVÁ, Gabriela. *Převodná ústrojí motorových vozidel: Diferenciály a děliče momentu. 1*. Praha: ČVUT, 2011, 56 s. ISBN 978-80-01-04855-9.
- [15] JAN, Zdeněk, VÉMOLA, Aleš, ŽDÁNSKÝ, Bronislav. *Automobily 2*. Knihu sestavila Ing. Hana Chlupíková. 1. vyd. Brno : Ing. Hana Chlupíková, c1997. 72 s.



- [16] Samagaga [online]. Taichung, ©2009 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://www.samagaga.com/>
- [17] BALLANTINE, Richard a Richard GRANT. *Velká kniha o bicyklech*. 1. Bratislava: Gemini, 1993, 191 s. ISBN 80-7161-011-9.
- [18] ŠMAK, Petr. *Návrh rámu HPV*. Brno, 2008, 84 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. Zdeněk Kaplan, CSc.
- [19] The Origins of Cycling in the Victorian Era. *West sound cycling* [online]. Bremerton, © 2017 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: [http://www.westsoundcycling.com/content.aspx?page\\_id=87&club\\_id=832465&item\\_id=386896](http://www.westsoundcycling.com/content.aspx?page_id=87&club_id=832465&item_id=386896)
- [20] LEADER FOX CONROE. *Okolokola* [online]. Chrudim, 2017 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <https://www.okolokola.cz/LEADER-FOX-CONROE-2014-BILA-ZDARMA-dopravne-a-cyklopocitac-d2790.htm>
- [21] AZUB T-Tris 26. *Azub bike* [online]. Uherský brod, 2017 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <https://www.azub.cz/azub-t-tris-26-skladaci-trikolka-s-velkym-zadnim-kolem/>
- [22] Rikša. *Wikipedie* [online]. 2016 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Rik%C5%A1a>
- [23] Okružní vyhlídkové jízdy. *Riksha* [online]. Praha, © 2012 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://www.riksha.cz/okruzni-jizdy>
- [24] Mistrovství baristů. *Zápisky* [online]. © 2017 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://www.malajani.cz/mistrovstvi-baristu-cr-2012/>
- [25] Řetězy - kazety, převodníky. *Cyklo ATOM* [online]. Praha, 2017 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://www.horska-silnicni-kola.cz/show-free.htm?fid=39>
- [26] Sram Red. *Mtbs* [online]. 2015 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://mtbs.cz/kategorie/mtbs-foto-redakcni-technika/fotka/127851#.WMR19m818dV>
- [27] AGOGS Tracer Trek. *Ekolo* [online]. Praha, ©2017 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <https://ekolo.cz/agogs-tracer-trek-1?var=14>
- [28] Seznam součástí jízdního kola. *Wikipedie* [online]. 2016 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Seznam\\_sou%C4%8D%C3%A1st%C3%AD\\_j%C3%ADzdn%C3%ADho\\_kola](https://cs.wikipedia.org/wiki/Seznam_sou%C4%8D%C3%A1st%C3%AD_j%C3%ADzdn%C3%ADho_kola)
- [29] Crossové kliky. *Kupkolo* [online]. Bílá Třemešná, ©2017 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: [https://www.kupkolo.cz/crossove-kliky-shimano-fc-m361-48-38-28-175mm\\_z1073/](https://www.kupkolo.cz/crossove-kliky-shimano-fc-m361-48-38-28-175mm_z1073/)
- [30] Náboj Shimano FH-M475. *Bike-eshop* [online]. Praha, ©2017 [cit. 2017-03-28]. Dostupné z: <https://www.bike-eshop.cz/diskove-naboje/naboj-shimano-fh-m475-zadni-cerny-36d-disk?gclid=CKax4qfx5NICFUkQ0wodeoAHGg#parametry&shsor=1>

- [31] SHIGLEY, Joseph E., Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. Brno: Vutium, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [32] SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS a František PROKEŠ. *Výběr z norem pro konstrukční cvičení*. 4. Brno: CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-751-2.
- [33] SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS, Jiří DVOŘÁČEK a František PROKEŠ. *Základy konstruování*. 4. Brno: CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-750-5.
- [34] Dimenzování ozubených kol klasických automobilních diferenciálů. *Docplayer* [online]. 2017 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/16237770-Dimenzovani-ozubenych-kol-klasickych-automobilnich-diferencialu.html>
- [35] Technické rady - Diferenciál X volnoběžky. *NaKole* [online]. ©2017 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://www.nakole.cz/diskuse/3712-diferencial-x-volnobezky.html>
- [36] Tre-och fyrhjulingar. *You Tube CZ* [online]. 2011 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=iJP9edk6PH8&t=60s>
- [37] Řetěz Sram PC 830. *Kupkolo* [online]. Bílá Třemešná, ©2017 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: [https://www.kupkolo.cz/retez-sram-pc-830\\_z3811/](https://www.kupkolo.cz/retez-sram-pc-830_z3811/)
- [38] SHIMANO SORA CS-HG50 8-SPEED CASSETTE. *The Bicycle Store* [online]. ©2014 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://www.bicyclestore.com.au/shimano-sora-cs-hg50-8-speed-cassette.html>
- [39] Přehazovačka Shimano Claris, RD-2400, 8s. *Kupkolo* [online]. Bílá Třemešná, ©2017 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: [https://www.kupkolo.cz/prehazovacka-shimano-claris-rd-2400-8s\\_z2464/](https://www.kupkolo.cz/prehazovacka-shimano-claris-rd-2400-8s_z2464/)
- [40] Zelený těsnicí tmel na motor a převodovku K161. *FORCH* [online]. Praha, 2017 [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://www.foerch.cz/product.aspx?p=0e1cc1bd-3200-48df-ad80-bd2b20a4b339&g=800c5015-6317-47a7-8d49-a5b3aab720e8>
- [41] Hliník. *Alfun Metal Service Senter* [online]. Bruntál, 2017 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.alfun.cz/hlinik>
- [42] Součinitel tření. *E-konstruktor* [online]. Praha, ©2013 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://e-konstruktor.cz/prakticka-informace/soucinitel-treni>

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

$a$	[m]	Rozchod kol
$M_l$	[Nm]	Točivý moment na levém kole
$M_p$	[Nm]	Točivý moment na pravém kole
$M_t$	[Nm]	Točivý moment přiváděný na klec diferenciálu
$n_k$	[min <sup>-1</sup> ]	Otáčky klece
$n_l$	[min <sup>-1</sup> ]	Otáčky levého kola
$n_p$	[min <sup>-1</sup> ]	Otáčky pravého kola
$R$	[m]	Poloměr kružnice opisující střed nápravy
$r_{dyn}$	[m]	Dynamický poloměr kola
$v_t$	[m·s <sup>-1</sup> ]	Otáčky klece
$\omega_l$	[rad·s <sup>-1</sup> ]	Úhlová rychlost levého kola
$\omega_p$	[rad·s <sup>-1</sup> ]	Úhlová rychlost pravého kola

## **SEZNAM PŘÍLOH**

**PŘÍLOHA 1: NÁVRH A VÝPOČET ŘETĚZOVÝCH PŘEVODŮ**

**PŘÍLOHA 2: PEVNOSTNÍ KONTROLA OZUBENÉHO SOUKOLÍ**

**PŘÍLOHA 3: KONTROLA ŘETĚZU PROTI PŘETRŽENÍ**

**PŘÍLOHA 4: VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE**

- Výkres sestavy diferenciálu
- Výkres klece
- Výkres satelitu
- Výkres centrálního kola
- Výkres hnacího víka
- Výkres řetězového kola

**PŘÍLOHA 5: CD**