



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

# PLANETOVÁ PŘEVODOVKA PRO NÁHON POSUVŮ CNC OBRÁBĚCÍCH STROJŮ

PLANETARY GEARBOX FOR THE FEED DRIVE OF CNC MACHINE TOOLS

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Vodvárka

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Jiří Marek, Ph.D., DBA

BRNO 2024



# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky  
Student: **Bc. Petr Vodvárka**  
Studijní program: Výrobní stroje, systémy a roboty  
Studijní obor: bez specializace  
Vedoucí práce: **prof. Dr. Ing. Jiří Marek, Ph.D., DBA**  
Akademický rok: 2023/24

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

## **Planetová převodovka pro náhon posuvů CNC obráběcích strojů**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Pro náhon posuvových os CNC soustružnických a frézovacích obráběcích center se v dnešní době používá elektromechanický náhon. Skládá se z servomotoru a planetové převodovky, na jejímž výstupním hřídeli je upevněn pastorek, anebo je hřídel pomocí spojky připojen ke kuličkovému šroubu. Planetová převodovka spolu s servomotorem jsou prostorově náročné na zástavbu, což přináší komplikace nejenom uživatelům, ale i výrobcům strojů samotným.

### **Cíle diplomové práce:**

Současný stav řešené problematiky a její rozbor.  
Systémový rozbor řešené problematiky.  
Návrh konstrukčních variant a výběr optimální varianty řešení.  
Technické výpočty optimální varianty a další potřebné výpočty.  
Komentář přiložené technické dokumentace.  
Technicko – ekonomické zhodnocení.  
Doporučení pro další rozvoj.

### **Seznam doporučené literatury:**

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, s.r.o., 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.

JANÍČEK, Přemysl a Jiří MAREK. Expertní inženýrství v systémovém pojetí. Praha: Grada, 2013. Expert (Grada). ISBN 978-80-247-4127-7.

MAREK, J. et al. Stavba a provoz CNC obráběcích strojů [online]. 1. vyd. Brno: Ústav výrobních strojů systému a robotiky, FSI, VUT v Brně, 23. 3. 2023, updated, průběžně aktualizováno [cit. 07.09.2023]. Učebnice Ústavu výrobních strojů, systému a robotiky, FSI, VUT v Brně, 1 svazek. Dostupné z: <http://147.229.45.89:8090/>. ISBN 978-80-07452- 4-7.

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

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D., FEng.  
ředitel ústavu

---

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

## **ABSTRAKT**

Práce se zabývá návrhem planetové převodovky pro náhon posuvů CNC obráběcích strojů. Podstatou návrhu je nový typ ozubeného kola (ozubeného věnce) s vnitřním a vnějším ozubením. Součástí práce je také systémový přístup, který koresponduje s navrženými konstrukčními uzly planetové převodovky. Byly navrženy tři varianty využití speciálního typu ozubení, z nichž jedna byla vybrána a vypracována až do finální podoby. Tato varianta se skládá z centrálního ozubeného kola, 3 satelitů, korunového kola s vnitřním a vnějším ozubením, výstupního kola, skříně převodovky a dalších komponent. Pro tento návrh byly provedeny potřebné výpočty v programu SMath studio, 3D modely a výkresy byly vypracovány v programu Inventor od společnosti Autodesk.

## **ABSTRACT**

This master thesis deals with design of planetary gearbox for driving the feeds of CNC machines. The base of the design is a new type of gear (gear ring) with internal and external teeth. The work also includes a systemic approach that corresponds to the proposed structural nodes of the planetary gearbox. Three variants of using a special type of gearing were designed. One of them was selected and developed into its final form. This variant consists of a central gear, 3 satellites, a sun gear with internal and external teeth, an output gear, gearbox housing, and other components. Necessary calculations were performed using the SMath Studio software and 3D models and drawings were created using Autodesk Inventor software.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Planetové převody pro CNC obráběcí stroje, způsoby náhonu CNC obráběcích strojů, výroba ozubených kol, náhon typu pastorek hřebem, náhon pomocí kuličkového šroubu s maticí

## **KEYWORDS**

Planetary gear systems in CNC machines, drive mechanisms of CNC machines, manufacturing of gears, rack and pinion drive system, drive mechanism using ball screw



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

VODVÁRKA, Petr. *Planetová převodovka pro náhon posuvů CNC obráběcích strojů*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/158096>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Jiří Marek.





## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěl poděkovat panu profesorovi Markovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce. Také děkuji své rodině a přítelkyni za podporu, kterou mi poskytly během studia a při tvorbě této závěrečné práce.



## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením prof. Dr. Ing. Jiřího Marka, Ph.D., DBA a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 15.04.2024

.....

Vodvárka Petr



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>MOTIVACE</b> .....	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b> .....	<b>19</b>
3.1	Lineární posuvové soustavy v konstrukci CNC obráběcích strojů.....	19
3.1.1	Náhon pomocí kuličkového šroubu a matice (KŠM) .....	19
3.1.2	Náhon pomocí lineárního motoru.....	21
3.2	Základní pojmy .....	23
3.3	Výroba ozubení.....	25
3.3.1	Výroba ozubených kol na konvenčních strojích.....	26
3.3.2	Dokončovací operace .....	28
3.3.3	Moderní způsoby výroby ozubených kol na CNC strojích .....	30
3.4	Planetové převody.....	33
3.4.1	Úvod do planetových převodů.....	33
3.4.2	Planetové převodovky, pastorky a hřebeny Apex Dynamics .....	35
3.4.3	Planetové převodovky, pastorky a hřebeny Wittenstein Group .....	39
3.5	Systémový rozbor řešené problematiky.....	43
<b>4</b>	<b>NÁVRH NOVÉ KONCEPCE PLANETOVÉHO PŘEVODU</b> .....	<b>46</b>
4.1	Návrhy jednotlivých variant .....	46
4.2	Předběžný výpočet.....	48
4.3	Návrh varianty S2 .....	49
4.3.1	Schematické znázornění varianty S2 řešené planetové převodovky .....	49
4.3.2	Výpočty pro variantu S2.....	50
4.3.3	Konstrukční uzel jedna a dva.....	55
4.3.4	Konstrukční uzel 3 a 4 – kolo s vnitřním a vnějším ozubením .....	59
4.3.5	Konstrukční uzel 5 – výstupní konstrukční uzel .....	59
4.3.6	Ostatní součásti planetového mechanismu a mazání.....	60
4.3.7	Parametry planetové převodovky ve variantě S2 .....	63
4.3.8	Bezpečnostní opatření planetové převodovky .....	63
4.3.9	Porovnání s planetovou převodovkou na trhu .....	64
<b>5</b>	<b>ZHODNOCENÍ A DISKUZE</b> .....	<b>65</b>
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>67</b>
<b>7</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b> .....	<b>69</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK</b> .....	<b>77</b>
8.1	Seznam tabulek .....	77
8.2	Seznam obrázků.....	77
8.3	Seznam symbolů a zkratk .....	79
<b>9</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>85</b>



# 1 ÚVOD

V současné době jsou kladeny vysoké nároky na přesnost ozubení zejména pro převody výrobních strojů. Jedním z požadavků jsou co nejmenší zástavbové rozměry a zároveň co nejnižší pořizovací náklady. Výrobci CNC obráběcích strojů také kladou pozornost na hlučnost převodovek, jejich životnost, bezporuchovost a nízkou náročnost na údržbu. Všem těmto kritériím musí převodovky v dnešní době vyhovovat.

Tato práce se zabývá návrhem a konstrukcí planetové převodovky vhodné pro náhon posuvů CNC obráběcích strojů. Pokud je vhodné použít převodovku pro náhon posuvů CNC obráběcích strojů, používá se právě převodovka s planetovým převodem. Práce je postavena na novém návrhu ozubeného kola (ozubeného věnce), které má vnitřní a vnější ozubení. Toto téma jsem si vybral, protože mě zajímalo, jestli je možné nějakým novým způsobem inovovat konvenční typ ozubených kol a převodů.

První část této práce pojednává obecně o náhonech posuvů CNC obráběcích strojů. Na tuto část navazuje všeobecné pojednání o ozubení, převodech, názvosloví a přehled elementárních znalostí z této oblasti. Následuje výroba ozubených kol a to; konvenčním způsobem a výroba ozubených kol moderním způsobem na CNC obráběcích strojích. V závěru první části je vypracována stručná rešerše planetových převodů a převodovek dostupných na trhu.

Druhá část této práce se již zabývá samotným návrhem ozubení a převodovky. Práce byla rozdělena dle systémového přístupu na několik konstrukčních uzlů, které budou vcelku dohromady tvořit planetovou převodovku. V této části byly vypracovány 3 konstrukční varianty, ve kterých je možné uplatnit kolo s vnitřním a vnějším ozubením. Jedna z variant byla vybrána a vypracována. Vypracovaná varianta se skládá z návrhu převodovky a jednotlivých komponent, sestavení převodovky, technických výpočtů potřebných pro návrh a kontrolu vzhledem k bezpečnosti systému a výkresové dokumentace. V textu práce jsou k nahlédnutí vybrané výpočty z příložené výpočetní dokumentace. V závěru druhé části jsou také shrnuty rozměry jednotlivých komponent, ze kterých se skládá samotná převodovka.

Ve třetí a poslední části závěrečné práce je zhodnocení samotného návrhu, doporučení pro praxi, možnosti navázání na tuto práci a závěr.





## 2 MOTIVACE

Ve strojních zařízeních, které konají práci, je téměř vždy nutné změnit počet otáček a velikost kroutícího momentu mezi hnacím a pracovním strojem. K tomuto účelu velmi dobře slouží ozubená kola. Ozubená kola mají přesně daný tvar, geometrii a velikost, a tím že velikost spolu zabírajících kol je různá, mění se tak i vstupní a výstupní kroutící moment a počet otáček. Ozubená kola dohromady tvoří soukolí. Toto soukolí je uloženo v převodové skříni a celá sestava se potom nazývá převodovka. V určitých aplikacích dokáže ozubené kolo společně s ozubeným hřebenem přenášet rotační pohyb na pohyb lineární translační [1], [2], [3], [4].



## 3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

### 3.1 Lineární posuvové soustavy v konstrukci CNC obráběcích strojů

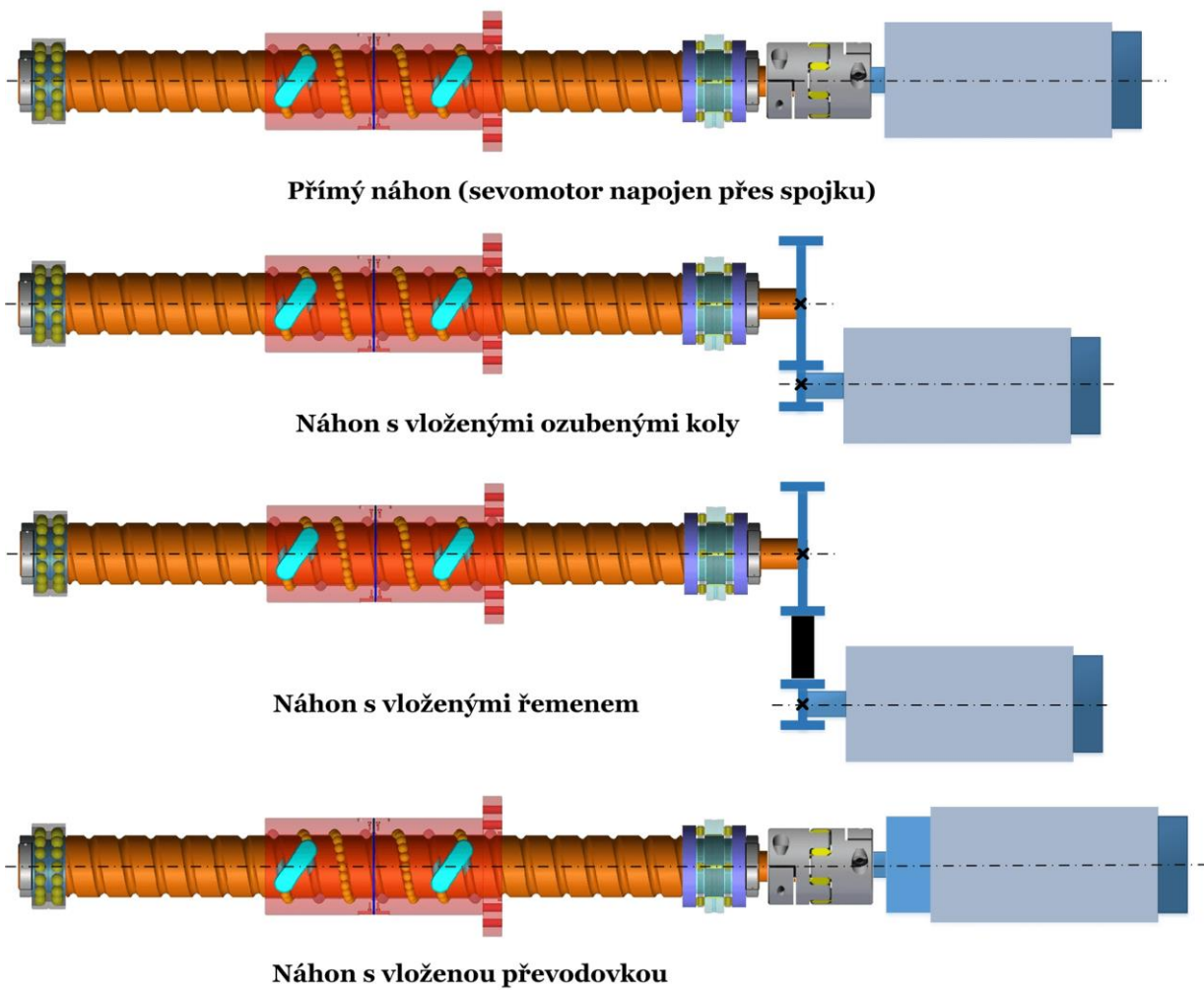
Přímočarý a rotační pohyb je základem pro realizaci relativních pohybů mezi nástrojem a obrobkem. Tyto pohyby je možné v zásadě realizovat pomocí náhonu typu kuličkového šroubu a matice nebo pastorku s hřebenem. Oba náhony především převádějí pohyb z rotačního na lineární translační. Lineární posuvová soustava je soustava pohyblivě spojených těles CNC obráběcího stroje. Tato tělesa mezi sebou přenáší účinky řezných sil od procesu obrábění i účinky tíhy. Schopnost CNC obráběcího centra pracovat s požadovanou přesností je závislá právě na několika aspektech lineárního posuvové soustavy. Klíčovou roli hraje především tuhost soustavy, její dynamická a tepelná stabilita. Součástí lineární posuvové soustavy a jejich dílů jsou vodící plochy, které zabezpečují přesnost vzájemných pohybů nástroje a obrobku [5].

Lineární posuvové soustavy lze rozdělit podle:

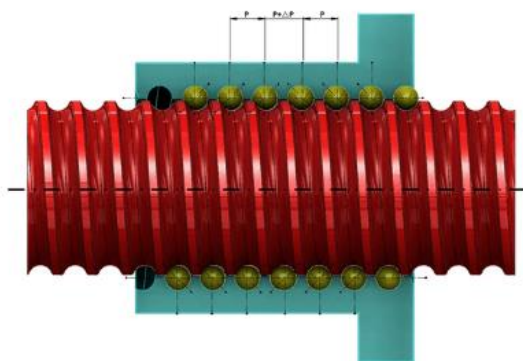
1. Technologické operace pro jejichž realizaci jsou užívány:
  - Soustružnické;
  - Frézovací;
  - Soustružnické a frézovací.
2. Počtu řízených (interpolujících) nebo polohovacích os:
  - Jednoosé;
  - Dvouosé;
  - Tříosé.
3. Realizace technologie (pohybu při obrábění):
  - Nespojité (nastavovací) pohyb;
  - Spojitý (souvislý) pohyb.
4. Náhonového mechanismu
  - Elektromechanický;
  - Hydraulicko-mechanický (méně často u jednoduchých aplikací)
5. Způsobu odměřování polohy:
  - Přímé
  - Nepřímé [5].

#### 3.1.1 Náhon pomocí kuličkového šroubu a matice (KŠM)

V zásadě lze použít pohon typu kuličkového šroubu s maticí (obr. 1), (obr. 2), (obr. 3), pohon pastorek-hřeben a náhon pomocí lineárního motoru. Pokud se jedná o náhon kuličkového šroubu a matice, je možné pohyblivé a statické elementy kombinovat. To znamená, že v některých případech se otáčí, a tím se i posouvá matice. V druhé variantě se otáčí pouze šroub a matice se posouvá. Aby se snížilo opotřebení závitů na šroubu, vymezila se vůle a zvětšila účinnost, tak se do závitů vkládají kuličky, které v závitech obíhají, a tím vzniká valivé vedení. Odtud název pro kuličkový šroub [5].



Obr. 1) Způsob napojení AC servopohonu na kuličkový šroub [5], [KSK Precise Motion], [Gervah]



Obr. 2) Kuličkový šroub s maticí [5], [KSK Precise Motion]



Obr. 3) KŠM Rm1605-1000mm [6]

Tento způsob náhonu má svoje výhody a nevýhody. Správné zhodnocení souvislostí a vybrání vhodného typu náhonu je poměrně složitý úkol.

#### Výhody KŠM

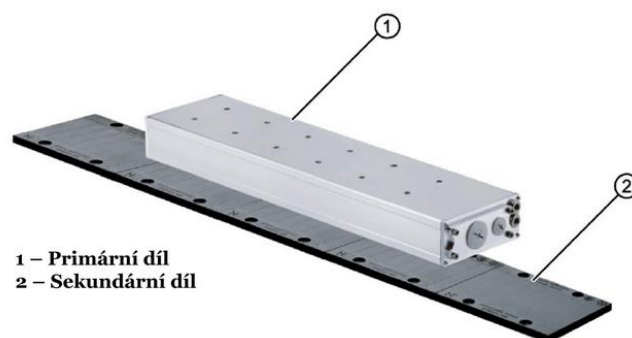
- vložený převod do pomala chrání před vlivem vnějších sil
- možnost vyvinutí větší posuvové síly (velký převod)
- ekonomický pro zdvihy do délky 4000 mm
- vysoká účinnost
- snadná montáž
- dlouhodobě ověřená konstrukce
- nejčastější způsob náhonu

#### Nevýhody použití KŠM

- dlouhé kuličkové šrouby se zkrucují a kmitají ohybově i torzně, vložený převod způsobuje zatížení setrvačným momentem
- menší styková tuhost
- hlučnější než pastorek a hřeben
- po čase ztráta předpětí
- kmitání od průhybu vlastní vahou
- posuvová rychlost omezena délkou šroubu
- opotřebení se zvyšuje s rychlostí
- je nesamosvorný [5].

### 3.1.2 Náhon pomocí lineárního motoru

Lineární motory (obr. 4) jsou elektromotory konstrukčně upravené tak, že nemají žádný vložený převod. Sílu potřebnou k posuvu vyvozují přímo z působení elektromagnetických sil na support stroje. Elektromagnetická síla vzniká mezi pohyblivým primárním dílem přišroubovaným ke stolu a pevným sekundárním dílem, který je přišroubovaný k loži. Pokud je potřeba větší posuvová síla, je možné motory zdvojit. Odměrování polohy musí být přesnější než u aplikací například s kuličkovým šroubem. Pohyblivá i pevná část motoru je vyrobena z feromagnetických materiálů, čímž vznikají přitažlivé síly, které musí zachytávat lineární vedení. Další nevýhodou je vznik tepla, které se snadněji rozšiřuje do okolní mechanické zástavby.



Obr. 4) Náhon pomocí lineárního motoru [5], [Siemens]

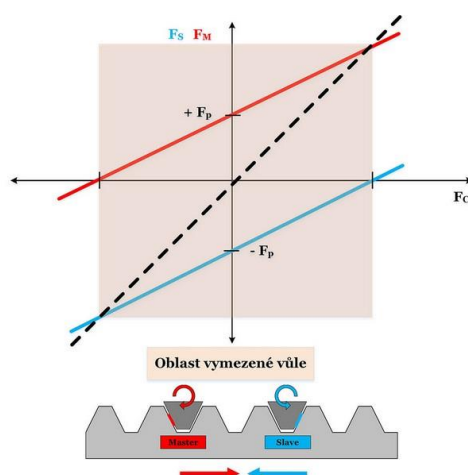
Používá se nejčastěji pro pohony posuvů CNC pracovních os s dlouhými zdvihy (tj. nad 5 metrů). Tento způsob náhonu (obr. 5) se nejčastěji využívá pro pohon podélné osy u portálových center. Délka tohoto typu náhonu, oproti KŠM<sup>1</sup>, není omezená, to je velkou výhodou, a lze tedy dosáhnout neomezené délky posuvu. Motory pro pohon pastorku jsou vybaveny převodovkou. Tento typ náhonu není samosvorný, a proto bývá opatřen brzdou, případně jiným druhem brzdového mechanismu.

Mezi pastorkem a hřeben je vůle, kterou je nutné vymezit proto, aby byl mechanismus dostatečně přesný. Vůle může vznikat mezi motorem a pastorkem například v kontaktu hřebene s pastorkem, ve spojení hřídele a pastorku anebo ve vložené převodovce. Vymezit tuto vůli lze několika způsoby. Při použití děleného pastorku jsou na hnací hřídeli dva pastorky pootočené proti sobě o úhel nutný k vymezení vůle. Pootočený mohou být buď pevně (mechanicky), nebo pružně (např. torzní pružinou, hydraulicky nebo jiným způsobem). Kvůli tomu, že je pastorek dělený, zabírá jedním směrem vždy jen jedna polovina šířky pastorku. Mechanismus má tedy poloviční únosnost a rychleji dojde k jeho opotřebení.



Obr. 5) Planetová převodovka s pastorkem a hřebenem

Velmi účinný způsob předepnutí<sup>2</sup> pastorků je pomocí metody elektronického předepnutí (tzv. Master Slave (obr. 6)). Princip režimu Master Slave je následující. Dva pastorky jsou poháněny přes vložené planetové převodovky, které jsou samostatně naháněny dvěma servomotory.



Obr. 6) Pohon pastorkem a hřebenem s elektrickým vymezením vůle – Master Slave [5]

<sup>1</sup> Při použití KŠM při dlouhých zdvihích mohou být problémy s dosažením vhodné tuhosti a nepřesnosti při vysokých otáčkách

<sup>2</sup> Jiné označení pro vymezení vůle

Oblast použití pastorku a hřebene závisí na konkrétním zadání. Obecně lze tento mechanismus doporučit tam, kde není vhodné použít KŠM, například kvůli potřebné délce zdvihu. Aby mohl stroj konat pohyb a práci, nestačí mít zajištěný jenom náhon posuvové soustavy, ale i její vedení ve stroji. Vedení musí být dostatečně tuhé, přesně vyrobené, odolné proti opotřebení. Musí mít dobrou jakost povrchu. Vedení je nutné také mazat. Vedení může být kluzné, valivé a kombinované [5].

### 3.2 Základní pojmy

K plynulému převádění kroutícího momentu z jednoho hřídele na druhý se používají nejčastěji ozubená kola. Při záběru zapadají zuby jednoho menšího kola (pastorku) do mezer druhého kola, jejich boky se o sebe opírají, a tím přenášejí sílu z jednoho kola na druhé. Jedná se tedy o mechanický převod silový. Nejčastěji se soukolí<sup>3</sup> využívá pro změnu počtu otáček nebo změnu velikosti kroutícího momentu. Toho je možné dosáhnout, pokud má pastorek a kolo rozdílné průměry. Ozubená kola jsou přesně definována modulem<sup>4</sup> (m) a počtem zubů (z). Je nutné, aby se při rovnoměrném otáčení pastorku i hnané kolo otáčelo rovnoměrně. Aby tato podmínka byla splněna, musí být během jedné otáčky převodový poměr (i) konstantní. Dále je důležité, aby nástroje na výrobu ozubení byly jednoduché. Ztráty třením a opotřebení zubů by měly být co nejmenší [1], [2], [3] [4].

$$i = u = \frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{M_{K2}}{M_{K1}}$$

kde

- $u$  Převodové číslo;
- $n_1$  Otáčky pastorku;
- $n_2$  Otáčky kola;
- $d_1$  Průměr roztečné kružnice pastorku;
- $d_2$  Průměr roztečné kružnice kola;
- $z_1$  Počet zubů na pastorku;
- $z_2$  Počet zubů na kole;
- $M_{K1}$  Vstupní kroutící moment;
- $M_{K2}$  Výstupní kroutící moment.

#### Rozdělení soukolí:

Podle vzájemné polohy os lze rozdělit na soukolí na rovnoběžné, různoběžné a mimoběžné.

Pro rovnoběžnou polohu os hřídelů (obr. 8), (obr. 9) se používají čelní soukolí s vnějším (obr. 7) nebo vnitřním (obr. 8) typem ozubení. Z kinematického hlediska si lze pohyb záběru představit jako odvalování dvou válců. Tvar boku zubu má obvykle evolventní<sup>5</sup> profil. Cykloidní profil ozubení bývá u převodu s ozubeným hřebenem. Čelní ozubená soukolí mívají velmi často šikmé boky zubů (obr. 9), dále mohou mít přímé, obloukové a šípové zuby.

<sup>3</sup> Soukolí – označení pro dvě ozubená kola, která spolu zabírají.

<sup>4</sup> Modul je normalizován dle ČSN 01 4608 nebo také dle ISO 53

<sup>5</sup> Evolventa – křivka, kterou opíše bod přímky, která se odvaluje po nehybné základní kružnici o poloměru  $r_0$

Ozubená kola se šikmými zuby<sup>6</sup> mají lepší vlastnosti jako například: plynulejší chod (protože mají plynulejší záběr) a mohou být menší, protože pastorek může mít menší počet zubů, aby ještě nedošlo k interferenci (podřezání v patě zubu). Ozubená kola se šikmými zuby se rozdělují na levá a pravá podle smyslu stoupání šroubovice šikmých zubů (obr. 9) [2], [7], [3], [8].



Obr. 7) Vnější čelní ozubené kolo s přímými zuby (M 2.5 80 zubů) [9]



Obr. 8) Vnitřní ozubené čelní kolo [10]



Obr. 9) Čelní ozubené soukolí se šikmými zuby [11]

Pro různoběžné osy hřídelů (obr. 10) se používá nejčastěji kuželových soukolí. Osy hřídelů mohou nabývat různých úhlů. Nejčastěji však osy svírají úhel 90°. Toto soukolí se typicky používá například

- u kuželových průmyslových převodovek,
- pro přenos kroutícího momentu na vrtuli helikoptér,
- pro převod mechanismů obráběcích strojů,
- pro automobilové diferenciály a nápravové převodovky

Jejich velké nevýhody jsou: citlivost na nepřesnost výroby a uložení, specifické požadavky na konstrukci uložení. Nejjednodušší na výrobu jsou přímé a šikmé křivky zubů. V dnešní době

<sup>6</sup> Úhel sklonu zubů  $\alpha$  bývá nejčastěji 20°



je ale možné vyrobit i zakřivené zuby jako je třeba ozubení typu: Gleason, Zerol, Klingelberg a Oerlikon [12].

U *mimoběžných poloh* os hřídelů (obr. 11) se používá šnekové soukolí. Jedno z ozubených kol je označováno jako šnek a druhé jako šnekové kolo. Šnek má velmi malý počet zubů (obvykle do 10 zubů). Dosahuje velkých převodových poměrů (silové –  $i = 1-100$ , kinematické  $i = 500-1000$ ), dokáže přenášet velké výkony  $P = 50-60$  kW). Má velmi klidný a tichý chod, je možné dosáhnout samosvornosti, jedná se o poměrně kompaktní konstrukci. Nevýhody jsou však velký skluz (ztráty třením), nižší účinnost, dražší výroba ozubení a značné opotřebení [13].



Obr. 10) Kuželové ozubené soukolí s přímými zuby [14]



Obr. 11) Šnek s ozubeným kolem [13]

### 3.3 Výroba ozubení

Výroba ozubení je poměrně složitý technologický proces. Existuje několik druhů metod výroby ozubených kol a dokončovacích operací pro ozubená kola.

Metody výroby ozubených kol: tváření, odlévání, obrábění, vstřikování a slinování.

#### Tváření

Ozubená kola lze vyrábět technologií tváření a to: válcováním (obr. 12), kováním a lisováním. Ozubená kola se válcují pomocí kalených čelistí, které lisují do materiálu profil zubových mezer. Tvářením se polotovar ozubeného kola zpevní a ozubené kolo má tak vyšší životnost [15].

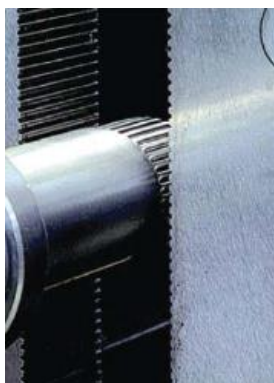
#### Odlévání

Ozubená kola je možné i odlévat. Odlitky ozubených kol používají ocel s vysokým obsahem uhlíku a některé jsou i legované [16].

#### Obrábění

Obrábí se celou řadou různých postupů, které se liší hlavně produktivitou, přesností a náklady a nároky na speciální stroje. Metody lze zařadit do dvou skupin podle toho, zda se profil nástroje do obrobku kopíruje zub po zubu (dělicí způsoby), anebo se profil zubů vytváří

odvalováním po obvodu obrobku (odvalovací způsoby). Dělicí způsoby i odvalovací způsoby výroby mohou být realizovány frézováním, obrážením nebo protahováním [17].



Obr. 12) Válcování ozubení [2]

### 3.3.1 Výroba ozubených kol na konvenčních strojích

#### Frézování dělicím způsobem

Frézování dělicím způsobem probíhá tak, že je obrobek upnut v dělicím zařízení a po vyfrézování jedné zubové mezery se přístrojem pootočí o jednu zubovou rozteč, takže se každá zubová mezera vyrábí zvlášť. K vyfrézování se používá tvarová (modulová) fréza s podtáčenými zuby nebo stopková fréza. Tvar zubové mezery se však mění s počtem zubů (i při použití stejného modulu). Aby se pro každý počet zubů nemusela používat jiná kotoučová fréza, tak se v praxi využívají sady fréz pro určitá rozmezí zubů. Používá se při kusové výrobě kol s menší přesností. Je poměrně nákladná, kvůli použití speciálního nástroje. Stopková fréza se využívá zejména při výrobě šípového ozubení [2], [18].

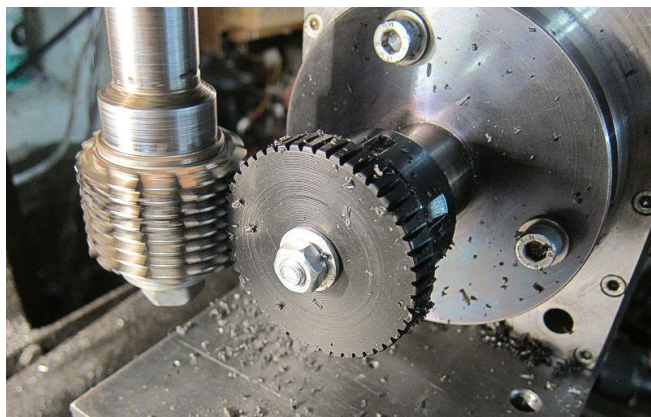
#### Odvalování

Profil odvalovací frézy (obr. 13) odpovídá základnímu profilu hřebenu. Používá se jeden nástroj pro daný modul kola. Toto kolo, na rozdíl od předešlých způsobů výroby, může mít libovolný počet zubů. Zuby frézy jsou uspořádány do šroubovice a zabírají do obrobku podobně jako šnekový převod. Obrobek se během obrábění plynule otáčí, a tak se nevyrobí každý zub zvlášť, ale všechny zuby zároveň. Při výrobě přímého ozubení je osa frézy nakloněna vůči rovině obrobku tak, aby se vyrovnalo stoupání šroubovice. Při výrobě šikmého ozubení se naklání ještě o  $\pm$  úhel sklonu zubů. Touto metodou je možné vyrobít poměrně přesná ozubená kola. Vyrábí se tak čelní ozubená kola (nejčastěji se šikmými zuby), šneková ozubená kola nebo i drážkování na hřídeli.

#### Obrázení

Obrážením se obrábí vnější i vnitřní rovinné plochy jednobřitým nástrojem (obr. 14). Hlavní řezný pohyb koná nástroj a jedná se o pohyb přímočarý vratný. Při zpětném pohybu nástroje se neodebírá tříska. Obrážecí nástroje se rozlišují podle smyslu pohybu nástroje na vodorovné a svislé. Obrážecí se dělí podle stejné logiky na vodorovné a svislé obrážecí [19]. Tímto způsobem lze vyrábět vnitřní a vnější, přímé šikmé a šípové ozubení [2]. Rozeznáváme dva způsoby obrázení. Jeden ze způsobů je obrázení odvalovacím způsobem za použití hřebenového nože. Obrobek se odvaluje vůči hřebeni se základním profilem – systém

Maag. Druhý způsob je obrábění ozubení pomocí kotoučového nože. Vzájemné odvalování obrobku a kotoučového nástroje – systém Fellows [2].



Obr. 13) Odvalovací fréza [20]



Obr. 14) Obrábecí nože [19]

### Protahování

Protahování je obrábění rovinných nebo tvarových ploch vnějších i vnitřních vícebřitým nástrojem. Tato metoda je velmi produktivní. Obrobená plocha má přesný tvar, rozměry a kvalitní povrch. Je ale poměrně nákladná a také se zde složitě vyrábí nástroje. Nejvhodnější je pro sériovou a hromadnou výrobu. Hlavní řezný pohyb, při výrobě protahováním, koná nástroj. Podle tvaru nástroje se může jednat o pohyb přímočarý, nebo otáčivý. Obrobek se upíná na stůl stroje. Během této výrobní operace je v záběru vždy více zubů, a tím se zvyšuje produktivita. Vnitřní ozubení lze vyrábět protahováním postupně (obr. 15) nebo najednou velkým trnem. Nástrojem je protahovací trn (obr. 16), který sestává z těchto částí:

- upínací
- vodící
- řezací
- kalibrovací

Zuby nástroje v řezací části jsou přerušeny drážkami pro lepší utváření třísek a také třísku dělí. Zuby v kalibrovací části nejsou dělené, mají stejnou výšku a jsou opatřeny fazetkou<sup>7</sup>. Zuby lze i přebrousit. Stroje na protahování se rozdělují na svislou protahovačku s vertikálním pohybem nástroje a vodorovnou protahovačku s horizontálním pohybem nástroje [21].



Obr. 15) Postupné protahování [22]



Obr. 16) Protahovací trny [21]

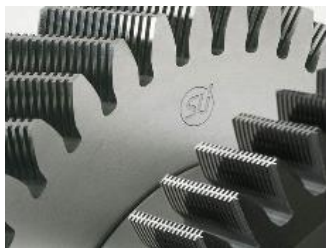
<sup>7</sup> Zkosená hrana, která označuje břit nebo ostří nástroje [78]

### 3.3.2 Dokončovací operace

#### Ševingování

Jedná se o dokončovací operaci pro úpravu čelních ozubených kol. Nástrojem pro ševingování je korigované ozubené kolo, šnekové kolo nebo hřeben. Na korigovaném ševingovacím ozubeném kole jsou radiální drážky pro vytvoření řezných hran a odvod třísek během procesu řezání. Záběr ševingovacího kola (hnací kolo) s obráběným kolem (hnané kolo) lze definovat jako záběr šroubového válcového soukolí. Dochází ke smyku nástroje a obrobku, protože obě kola mají jiný sklon zubu. Během toho smýkání dochází k řezání. Ševingování se dělí na podélné a diagonální, podle sklonu osy obrobku a osy pohybu pracovního stolu. Tato operace se provádí na speciálních ševingovacích strojích.

Ševingováním je možné dosáhnout vysoké rozměrové a tvarové přesnosti IT4 až IT6, dobré drsnosti povrchu –  $R_a = 0,4 \mu\text{m}$  až  $0,8 \mu\text{m}$ . Ozubená kola (obr. 17) pro ševingování musí být vyrobena s větší přesností než pro broušení. Je vhodné pouze pro nekalená (měkká) kola nebo po cementaci před kalením [22], [15], [2] [23].



Obr. 17) Ševingovací kolo [22]

#### Honování

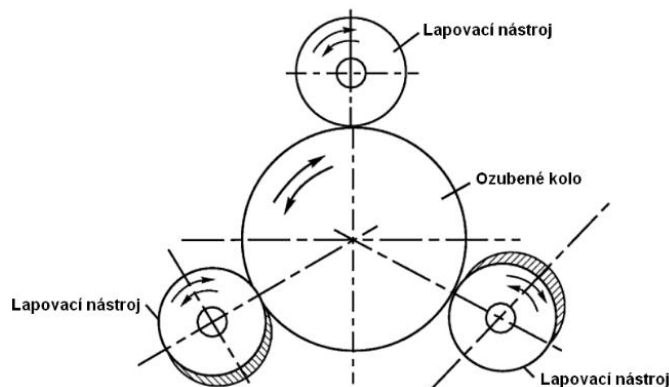
Honování lze v podstatě jednoduše popsat jako broušení malou řeznou rychlostí. Někdy se označuje jako brousící ševingování. Velmi častou se používá pro dokončování vnitřních válcových ploch (vnitřní honování) například válců spalovacích motorů, hydraulických zařízení nebo také kompresorů. Může se používat také k dokončování vnějších válcových ploch například čepů, pístů nebo také **kalených** ozubených kol. To je podstatný rozdíl mezi ševingováním a honováním. Probíhá však na stejných strojích jako ševingování. Nástrojem může být ozubené kolo (obr. 18) vyrobené ze směsi plastu a brusiva nebo ocelové ozubené kolo, jehož zuby jsou pokryty tenkou vrstvou diamantového brusiva, vázaného pryskyřičným nebo kovovým pojivem. Při hrubovacím honování se dosáhne přesnosti IT6 až IT7 a drsnosti povrchu  $R_a 0,4 \mu\text{m}$  až  $0,8 \mu\text{m}$ . Při jemném honování lze dosáhnout stupně přesnosti IT5 a drsnosti povrchu  $R_a 0,1 \mu\text{m}$  až  $0,2 \mu\text{m}$ . Honováním se dosahuje velké přesnosti geometrického tvaru válcových ploch. Honováním se snižuje hlučnost a nebezpečí pittingu [24], [22], [15], [2] [23].



Obr. 18) Honovací kolo [24]

## Lapování

Jedná se o dokončovací operaci pro výrobu kalených kol. Pro proces se používá jedno nebo tři lapovací kola (obr. 19), mezi které je vloženo obráběné kolo. Do prostoru se přivádí volně rozptýlené brusivo (např. karbid křemíku nebo umělý korund), které je v kapalině (např. olej, petrolej) nebo brusná pasta. Postup lapování je tento: kola se otáčejí, a tímto pohybem obrušují ozubené kolo. Tlakem mezi zuby obráběného kola a nástrojem se zatlačují brusná zrna do měkkého povrchu nástroje a odebírají pak z povrchu zubů obráběného kola velmi jemné třísky. Chemicky aktivní látky v mazadle působí na kov povrchové vrstvy, a tím značně zrychlují proces. Lapování probíhá na lapovacích strojích.



Obr. 19) Schéma lapovacího procesu [24]

Nástrojem je lapovací kotouč ve tvaru sduženého ozubeného kola. Někdy je také možné použít tzv. zaběhávání – lapování probíhá přímo na spolu zabírajících kolech, bez použití lapovacího nástroje, pouze za použití lapovací pasty. Lapováním je možné dosáhnout vynikajících přesností IT1 až IT3 a velmi malé drsnosti povrchu Ra 0,02  $\mu\text{m}$  až Ra 0,05  $\mu\text{m}$  [25], [24], [22].

## Broušení

Jedná se o nejpoužívanější způsob dokončování ozubených kol. Samotný proces broušení je možné rozdělit do několika dalších podskupin podle technologického způsobu broušení.

- Broušení dělicím způsobem tvarovými kotouči
- Broušení odvalovacím způsobem

### Broušení dělicím způsobem tvarovými kotouči

Brousí se jedním kotoučem, který má profil ve tvaru zubové mezery. Broušené ozubené kolo je upnuto v dělicím zařízení. Po vybroušení zubové mezery se obrobek automaticky otočí o jednu zubovou rozteč. Jedná se o méně přesný způsob broušení.

### Broušení dvěma kotouči s profilem ve tvaru boku zubu

Používají se dva brousící kotouče. Jeden brousící kotouč má tvar levého boku zubu a druhý brousící kotouč má tvar pravého boku zubu. Broušení ozubených kol tímto způsobem je přesnější a výkonnější než broušení s jedním tvarovým kotoučem.

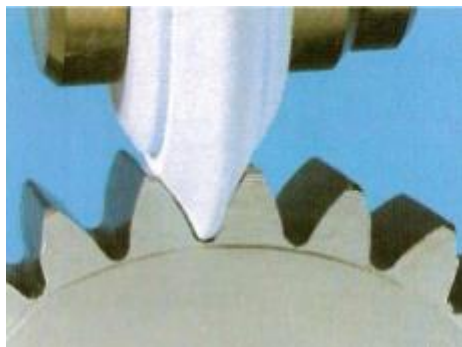
### Broušení dělicím způsobem s odvalem boku zubu

Pokud se broušený zub odvaluje po jednom kotouči, jedná se o systém Niles. Pokud se broušený zub odvaluje po dvou kotoučích jedná se o systém Maag.



### Broušení odvalovacím způsobem

Tento způsob dokončování (obr. 20) je podobný procesu odvalovacímu frézování. Nástrojem je brousící šnek. Tento šnek nahrazuje odvalovací frézu. Řezný pohyb koná rotující brusný kotouč. Obrobek se pootočí o jednu zubovou rozteč, a tak se plynule brousí všechny zuby. Brousící kotouč se současně pohybuje ve směru broušených zubů, a tím se brousí zuby ozubeného kola po celé svojí délce. Tímto způsobem broušení lze dosáhnout nejvyšší produktivity při broušení ozubení. Broušením odvalovacím způsobem lze brousit i kalená kola [24]. Broušením na nejpřesnějších strojích lze dosáhnout přesnosti 2-3 stupně dle ISO, přesnost odvalovacím broušením se pohybuje v intervalu 4-6 stupňů dle ISO [2].



Obr. 20) Kotouč s profilem ve tvaru zubové mezery [24]

### **3.3.3 Moderní způsoby výroby ozubených kol na CNC strojích**

Proces výroby ozubeného kola podle výše popsaných metod již neprobíhá výhradně na speciálních ozubárenských strojích. Mnozí výrobci CNC obráběcích multifunkčních strojů se zaměřili na ozubené kolo jako na výhodný potenciální obrobek, především pokud jde o jeho hromadnou výrobu. Také vývojáři CAM softwaru přispívají k optimalizaci procesu výroby ozubení. V tomto směru je dobré zmínit velkou progresi výrobců řezných nástrojů [17].

#### CNC frézky pro výrobu ozubení

Jedním z výrobců ozubárenských strojů je společnost TOS Čelákovice. Nabízí portfolio CNC ozubárenských strojů. Vyrábí 3 typy svislých odvalovacích frézek na ozubení. Tyto frézky jsou určeny pro frézování ozubených kol čelních s přímými i šikmými zuby. Dokáží ale frézovat i jiná kola, například: řetězová, šneková kola (frézovaná radiálním i tangenciálním způsobem) a jiné druhy ozubení frézovaných odvalovacím způsobem. Frézky umožňují frézování kalených kol a rychlostní frézování nekalených kol tvrdokovovými nástroji. Stroje jsou vhodné pro sériovou i kusovou výrobu. Automatický pracovní cyklus stroje a případně vybavení stroje zásobníkem obrobků umožňuje více strojovou obsluhu. V základním provedení je stroj vybaven řídicím systémem Sinumerik 840 D sl a pohony od firmy Siemens. Mají šest řízených os.

#### Svislá odvalovací frézka na ozubení OFA 32 CNC 6 (obr. 21)

- Max modul frézovaného: 7 mm
- Max průměr frézovaného ozubení: 320 mm [26].

#### Svislá odvalovací frézka na ozubení OFA 75 CNC 6

- Max modul frézovaného: 12 mm
- Max průměr frézovaného ozubení: 750 mm [27].

### Svislá odvalovací frézka na ozubení OFA 100 CNC 6

- Max modul frézovaného: 14 mm (pro frézování oceli do 600 MPa až 20 mm)
- Max průměr frézovaného ozubení: 1050 mm [28].



Obr. 21) Svislá odvalovací frézka na ozubení OFA 32 CNC 6 [26]

### Svislá odvalovací obrážeka OHA 50 CNC 5

Svislá odvalovací obrážeka OHA 50 CNC 5 s řídicím systémem SINUMERIK 840 D sl, který zajišťuje řízení pěti os. Stroj je vybaven digitálními servopohony pro řízení os. Stroj je určený pro obrázení vnějšího i vnitřního ozubení čelních ozubených kol s přímými i šikmými zuby. Na stroji je možno obrážet i různé křivkové kotouče, ozubené segmenty a při použití zvláštního příslušenství i hřebeny do délky 1000 mm. Pro každé obrázení je možno navolit až 20 řezů. Pro každý řez lze zvolit optimální řezné podmínky.

- Max modul frézovaného: 8 mm
- Max průměr frézovaného ozubení: 500 mm [29].

### Multifunkční obráběcí centra společnosti OKUMA (obr. 22)

Japonská společnost Okuma vyrábí mimo jiné multifunkční vodorovná obráběcí centra. Jedná se o stroje z kategorie označené jako Multus. Stroje Multus jsou inteligentní multifunkční obráběcí stroje, které kombinují možnosti soustružení a frézování, čímž nahradí dva až tři konvenční stroje, a sníží tak manipulační časy a nároky na prostor. Posuvové osy X, Y a Z společně s natáčecí osou B polohují nástrojovou hlavu. Hlavní vřetenou je vybaveno C-osou. Různé varianty provedení stroje dovolují zvolit provedení bez koníka, s koníkem nebo s protivřetenem, a to v různých délkových variantách.



Obr. 22) Okuma Multus U3000 (1SW-1500) [30]

Thermo-Friendly Concept zaručuje výjimečnou rozměrovou stabilitu i při změnách okolní teploty nebo prodlevách činnosti stroje. Snižuje tím nutnost zásahu aktivní kompenzace, kterou je stroj také vybaven. Stroje Multus řady U (U3000-U5000) také umožňují obrábění ozubených kol buď odvalovací frézou upnutou ve frézovací hlavě nebo také stopkovou frézou umožňuje výrobu např. čelního kuželového ozubení se spirálními zuby. Při tomto obrábění simultánně pracují osy C, B, X, Y, Z. Firma Okuma má vlastní řídicí systém s dotykovou obrazovkou **OSP-P300SA** [30], [31], [17].

Americký výrobce obráběcích strojů Gleason corp. také nabízí široké portfolio obráběcích a výrobních strojů pro ozubená kola. Společnost se specializuje na výrobu a distribuci strojů určených pro výrobu kuželových a válcových ozubených kol. Gleason corp. vyrábí a dodává horizontální a vertikální CNC odvalovací frézky (obr. 23) a CNC obrážky.

Mimo jiné společnost Gleason nabízí CNC stroje pro dokončování ozubených kol. Například vyrábí stroje pro ševingování, lapování, honování (obr. 24) a broušení.



Obr. 23) Vertikální odvalovací frézka řady Genesis 160 HCD [32]



Obr. 24) Univerzální jedno-vřetenový honovací stroj 260HMS [33]

Gleason se zabývá kompletní výrobou ozubených kol a šneků, proto také nabízí k dodávaným strojům příslušné nástroje (obr. 25) a metrologické systémy (obr. 26) (klasické nebo laserové) [34].



Obr. 25) Ševingovací kola firmy Gleason pro vnější a vnitřní ozubení [35]



Obr. 26) Metrologický systém Gleason 300GMS nano [36]



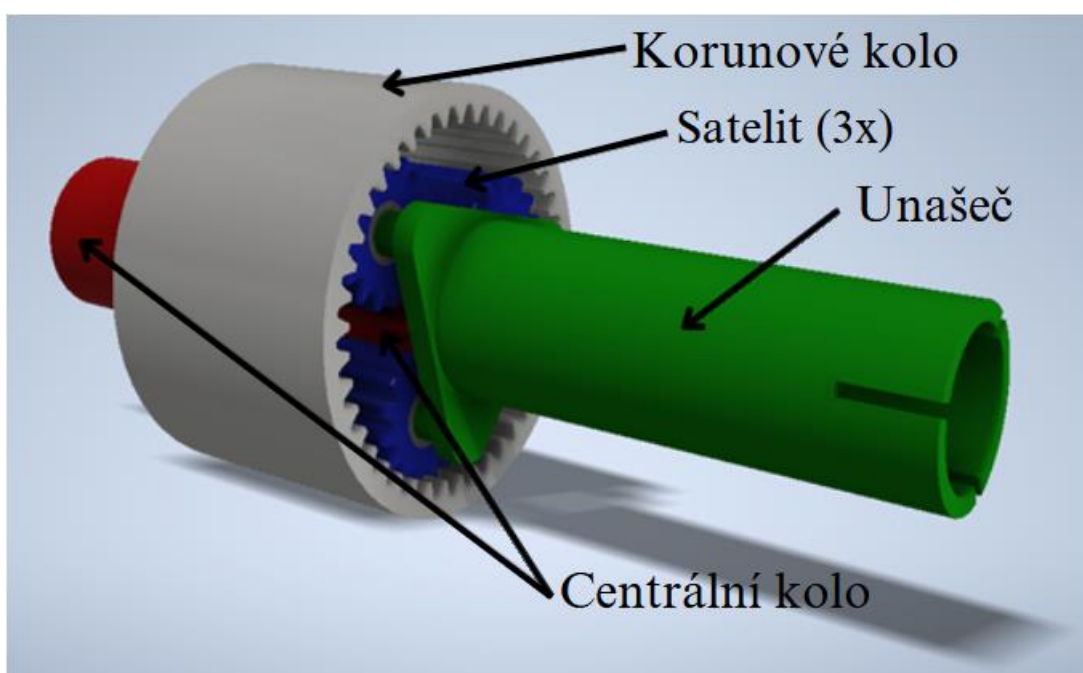
## 3.4 Planetové převody

### 3.4.1 Úvod do planetových převodů

Převodovka je stroj nebo zařízení, které slouží ke změně otáček a kroutícího momentu. Skládá se z 2 hlavních komponent převodové skříně a převodového mechanismu. Často jsou součástí převodovky i další jiné konstrukční prvky například ložiska, šrouby, kolíky, pera, čepy, matice, podložky atd... [37], [4].

Z obrázku (obr. 1) je zřejmé, že jeden z možných způsobů náhonu je s vloženou převodovkou mezi elektromotorem a kuličkovým šroubem. Tato převodovka obvykle bývá s planetovými převody. Pokud aplikace vyžaduje použití lineárního pohonu pastorek a hřeben, převodovka použitelná pro tento pohon je rovněž planetová.

Princip planetového převodu byl objeven v roce 1828 Bernardem Lassimonem. Planetová převodovka je velmi kompaktní mechanismus, který ale dokáže dosáhnout velkého převodového poměru (až 1000). Má vysokou účinnost a také je schopný přenášet velký výkon (až 65 MW). Z kinematického hlediska dokáže přenášet vysoké otáčky a dokáže vyvinout vysokou obvodovou rychlost [1]. Planetová převodovka se skládá z centrálního ozubeného kola, několika satelitů a korunového ozubeného kola.

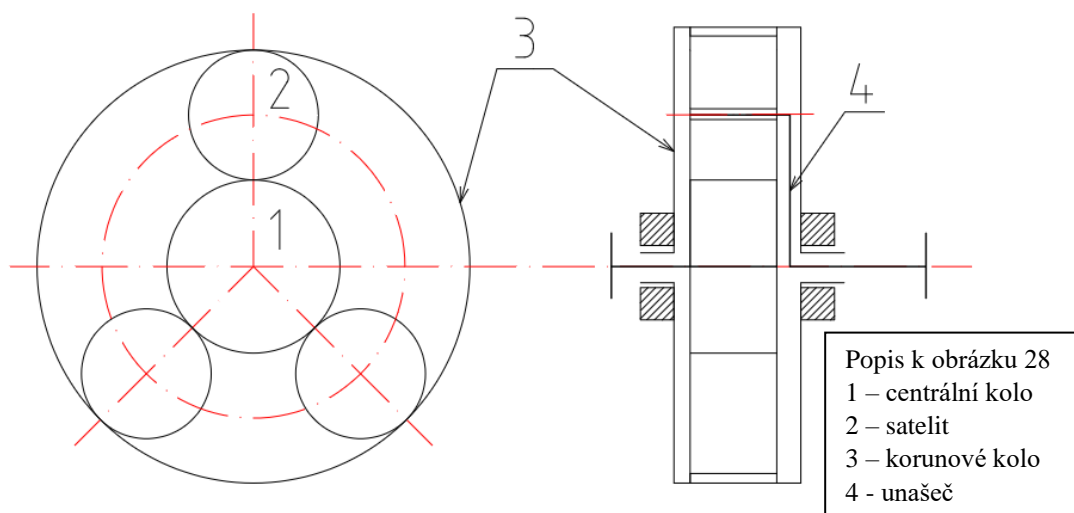


Obr. 27) Planetový mechanismus [38]

#### Princip činnosti planetových převodovek

Všechna kola jsou ve stálém záběru. Osy satelitů konají krouživý pohyb kolem centrálního kola. Korunové kolo může být vetknuto do rámu, a pak se tedy nepohybuje, ale pohybuje se centrální kolo. Pokud se však korunové kolo pohybuje, tak se již nepohybuje centrální kolo. Název planetová převodovka je odvozen od pohybu jednotlivých satelitů, které konají pohyb kolem centrálního kola. Tento pohyb je podobný kroužení planet kolem slunce a zároveň se satelity otáčejí kolem svých vlastních os. Na obrázku (obr. 28) je zjednodušeně znázorněn princip a uspořádání planetového mechanismu. Jsou-li u jednoduchého planetového

převodu volné všechny tři základní členy (1,2,3), jedná se o diferenciál<sup>8</sup> (2 stupně volnosti). Diferenciál umožňuje skládat nebo rozkládat kroutící moment. Tato funkce se využívá u obráběcích strojů (skládání pohybu) nebo v automobilovém diferenciálu (rozkládání pohybu) [1], [39]. Pokud je spojen s rámem jeden ze základních členů (1 nebo 3), vzniká planetový převod s jedním stupněm volnosti.



Obr. 28) Jednoduchý planetový převod [39]

#### Použití planetových převodovek

- Pohony obráběcích strojů
- Diferenciál v automobilovém průmyslu
- Pohony robotů
- Převodovky v ručním nářadí
- Převodovky v navijácích
- Pohon pásového dopravníku

#### Výhody a nevýhody planetového převodu

##### Výhody

- Kompaktní konstrukce
- Nízká hmotnost
- Jednodušší řazení díky kolům ve stálém záběru
- Větší životnost kol než v klasické převodovce

##### Nevýhody

- Složitější montáž
- Vyšší požadavky na přesnost výroby
- Vyšší výrobní náklady

<sup>8</sup> Diferenciál je mechanické zařízení, které má za úkol rozložit točivý moment ze vstupní hřídele na dvě jiné výstupní/hnané hřídele při, tom umožňuje, aby se hnané hřídele nemusely otáčet stejnými otáčkami n. [79], [1]

### 3.4.2 Planetové převodovky, pastorky a hřebeny Apex Dynamics

Společnost dodává na trh planetové a spirálové převodovky. K dostání jsou přímé a úhlové planetové převodovky, kuželové převodovky, hypoidní převodovky, hřebeny a pastorky a mazací systémy. Firma vyrábí přímé planetové převodovky v 19 řadách. Pro aplikaci hřebenu a pastorku je doporučena řada AD, PD, AH a jejich úhlové varianty. Řada planetových převodovek Apex AD s výstupní přírubou vyniká vysokým radiálním, axiálním zatížením při maximální přesnosti i zatížení. Převodovky AD využívají šikmé ozubení. Převodovky AD jsou také velmi krátké a kompaktní [40], [41].

Parametry převodovek řady AD (obr. 29):

Jsou navrženy pro trvalý (S1) nebo cyklický (S5) provoz

Tělo z nerezové oceli, příruba pro motor z černého hliníku

Výstupní příruba pro pastorek ISO 9409

Výstupní moment:

- T<sub>2N</sub> : 14 Nm - 2000 Nm

Převodové poměry

- 1-stupňová: 4 / 5 / 7 / 10
- 2-stupňová: 20 / 25 / 35 / 40 / 50 / 70 / 100 / 16 / 21 / 31 / 61 / 91

Vůle v ozubení

- 1-stupňová: ≤ 1 arcmin / ≤ 3 arcmin / ≤ 5 arcmin
- 2-stupňová: ≤ 3 arcmin / ≤ 5 arcmin / ≤ 7 arcmin

Poměrně vysoká účinnost

- 1-stupňová: ≥ 97%
- 2-stupňová: ≥ 94%

Jedná se o kompaktní provedení převodovky s nízkou hlučností a jednoduchou montáží. Možnost převodu až  $i=200$ . K dostání několik velikostí [40], [42] .



Obr. 29) Přímá planetová převodovka řady AD [40]

Společnost také vyrábí a dodává úhlovou variantu planetové převodovky řady ADR, která má obdobné parametry.

Parametry převodovek řady PD:

Jedná se o ekonomickou variantu s ISO přírubou.

- výstupní příruba pro pastorek dle ISO9409
- 4 velikosti: 53 mm až 110 mm
- rozsah momentů 10 až 232 Nm
- široký rozsah převodových poměrů (1-stupňová  $i=3-10$ ; 2-stupňová  $i=15-100$ )

- malé vůle v ozubení ~ 6 arcmin až ~ 10 arcmin
- nízká hlučnost  $\leq 56$  dB a vysoká účinnost až 97%
- tuhé mazivo pro celou životnost
- převodovky lze spojit s jakýmkoliv motorem během několika sekund

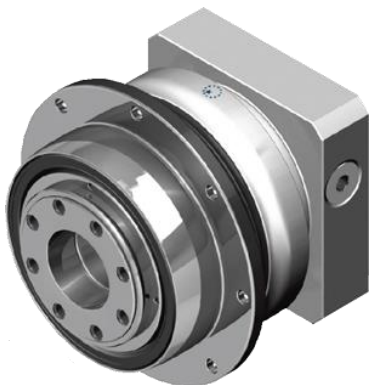
Společnost také vyrábí a dodává úhlovou variantu planetové převodovky řady PDR s obdobnými parametry. Ani řada PD ani PDR však nemají šikmé ozubení [43], [44].

Parametry převodovek řady AH (obr. 30):

Planetová je vhodná pro přenos velkých výkonů s vysokou přesností.

- Navrženo pro trvalý (S1) nebo cyklický (S2) provoz
- Využívá šikmé ozubení
- Výstupní příruba pro pastorek dle ISO9409
- 9 velikostí: 64 mm až 450 mm
- Rozsah výstupních momentů 24 Nm - 12 405 Nm
- Široký rozsah převodových poměrů (1stupňová  $i=4-10$ ; 2stupňová  $i=16-100$ )
- Malé vůle v ozubení ~ 1 arcmin až ~ 2 arcmin
- Účinnost až 97%
- Tuhé mazivo pro celou životnost
- Převodovky lze spojit s jakýmkoliv motorem během několika sekund

Oproti řadě převodovek AD mají převodovky řady AH ozubená kola v převodovce vyrobená jinými technologickými úpravami, což snižuje opotřebení ozubení [45].



Obr. 30) Přímá planetová převodovka řady AH [45]



Obr. 31) Úhlová planetové převodovka řady AHK [46]

Opět je k dostání i úhlová verze převodovky – AHK (Obr. 31), která však má až 4 stupně s poměrem  $i=12-10000$ . Dokáže přenést o něco menší moment (maximálně 5610 Nm) než přímá převodovka řady AH [45], [46].

Všechny planetové převodovky společnosti Apex Dynamics jsou k dostání v několika rozměrových variantách. Jsou poměrně kompaktní a snadno se montují. Převodovka splňuje ATEX certifikaci do prostředí s nebezpečím výbuchu.

### Pastorky a hřebeny od společnost Apex Dynamics

Společnost Apex Dynamics vyrábí pastorky s přímým a šikmým ozubením a k nim odpovídající hřebeny se šikmým a přímým ozubením. Pastorky jsou vyráběny v několika sériích podle způsobu uchycení k přírubě a to:

- Se zubovou spojkou – řada A
- S navařenou přírubou – řada B
- Jako standardní pastorek – řada C
- S vnitřním drážkováním dle DIN 5480 – řada D
- S drážkou pro pero, s nábojem – řada E/F
- S hladkou hřídelí – řada G/H.

Všechny typy pastorků jsou vyráběny z oceli třídy 16MnCr5, která je následně cementována. Mají indukčně kalené a broušené ozubení. Tvrdost ozubení je 60 HRC a všechny pastorky jsou kompatibilní s převodovkami řady AD/ADR, PD/PDR a AH/AHR (viz výše) [47], [48].

Pastorky s přímým ozubením mají úhel záběru 20°. Tolerance šířky zubu je e24 (dle DIN 3967).

Tab 1) Pastorky s přímým ozubením Apex Dynamics [49], [50], [51], [52], [53].

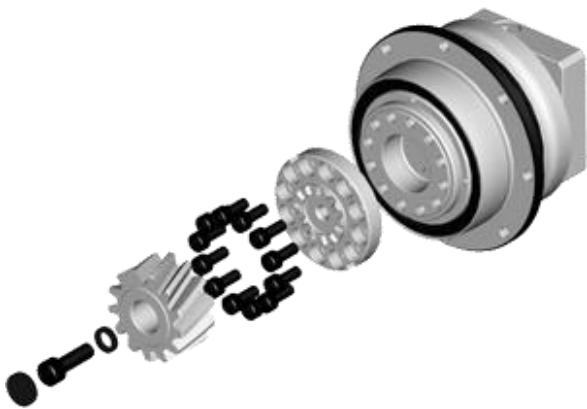
Pastorek s přímým ozubením	Řada A	Řada B	Řada E	Řada G	Řada H
<b>Modul</b>	2/3/4/5 / 6 / 8 / 10	2 / 3 / 4 / 5 / 6 / 8 /	2 / 3 / 4 / 5 / 6 / 8 / 10	2 / 3 / 4 / 5 / 6	2 / 3 / 4 / 5 / 6
<b>Krouticí moment</b>	10 790 Nm	3 680 Nm	16 920 Nm	X	X
<b>Posuvová síla</b>	143 867 N	70 769 N	169 200 N	X	X

Tab 2) Pastorky s šikmým ozubením Apex Dynamics [54], [55], [51], [56], [57], [58].

Pastorek s šikmým ozubením	Řada A	Řada B	Řada C	Řada D	Řada E/F
<b>Modul</b>	2 / 3 / 4 / 5 / 6 / 8 / 10	2 / 3 / 4 / 5 / 6 / 8 /	2 / 3 / 4 / 5 / 6 / 8 /	2 / 3 / 4 / 5 / 6 / 8	1,5 / 2 / 3 / 4 / 5 / 6 / 8 / 10
<b>Krouticí moment</b>	14 090 Nm	3 250 Nm	3 250 Nm	3 250 Nm	1 010 Nm
<b>Posuvová síla</b>	189 090 N	63 814 N	63 814 N	63 814 Nm	19 831 N

Pastorky série C umožní snadné připojení k převodovkám s výstupní přírubou. Série C má standardizovanou rozteč šroubů dle ISO 9409-1-A. V případě menších pastorků (malý počet zubů) lze tyto pastorky kombinovat s redukční přírubou. Obě varianty pastorků série E a E/F lze spojit s četným množstvím převodovek případně nasadit přímo na hřídel motoru. Dodávají se ve dvou variantách s nábojem a bez náboje. V případě varianty s nábojem lze dodat včetně svěrného pouzdra pro bezvůlové spojení [51], [56]. Pokud použijeme pastorky s hřídelí řady G (obr. 33) a H, je nutné dodržet řádné mazání (automatický mazací systém nebo každodenní

manuální mazání) [53], [54]. Všechny pastorky se šikmým ozubením (obr. 32) mají levý typ šikmého ozubení. Pastorky s šikmým typem ozubení jsou, díky své geometrii a lepšímu průběhu záběru, méně hlučné než pastorky s přímým ozubením.



Obr. 32) Pastorek s šikmým ozubením – série A – zubová spojka [54]



Obr. 33) Pastorek s hřídelí s drážkou pro pero, s nábojem – série G [52]

#### Hřebeny s přímým a šikmým ozubením:

Apex Dynamics nabízí široké portfolio ozubených hřebenů. Doposud neexistuje žádná mezinárodní norma (ISO/DIN) definující požadavky na přesnost ozubených hřebenů a každý výrobce si definuje své vlastní normy. Málokdy dostane uživatel kompletní informace o tolerancích. Pouze zřídka dostane uživatel informace o odchylce čelní rozteče (Single Pitch Error) nebo geometrii (rovinnost, zkroucení). Apex tedy stanovil standard kvality pro ozubené hřebeny APEX přesně podle norem DIN / ISO pro ozubená kola včetně jejich tolerancí [59], [60].

#### Hřebeny s přímým ozubením

- úhel záběru 20°
- v metrických modulech 1 / 1.5 / 2 / 2.5 / 3 / 4 / 5 / 6 / 8 / 10 / 12
- v palcové soustavě Pitch 5 (modul 1,591) / 10 (modul 3,138) / 13.33 (modul 4,244)
- v třídách kvality 4 / 5H / 5 / 6 / 7 / 8 / 9 / 10
- v délkách od 250 mm až přes 2000 mm
- s broušeným ozubením / s broušením ze všech stran
- materiály: ocel 45C, 16MnCr5, 15CrMo5, 42CrMo4 nebo nerez ocel X5CrNi189
- tepelné úpravy: kalení/kalení a popouštění/indukční kalení/cementace s následným indukčním kalením/žihání/ normalizační žihání [59].

#### Hřebeny se šikmým ozubením (obr. 34)

- šikmé ozubení pravé 19°31'42" (19.5283°)
- v metrických modulech 1.5 / 2 / 2.5 / 3 / 4 / 5 / 6 / 8 / 10 / 12
- v třídách kvality Q 4 / 5 / 5H / 6 / 6M / 8 / 10
- v délkách od 500 mm do 2000 mm
- povrch ozubení a tělo hřebene: broušené / frézované

- materiály: uhlíková, legovaná a popouštěná legovaná ocel
- tepelné zpracování: kompletní cementace/popouštění/indukčně kalené ozubení/normalizováno [60].

Způsob montáže je pro oba typy ozubených hřebenů stejný: bez montážních otvorů nebo s montážními otvory pro integraci s lineárním vedením (90° a 180°). Obě varianty hřebenů mají stejné 4 typy povrchové úpravy: bez úpravy/niklování/ fosfátování/černění

Pro obráběcí stroje, velká portálová centra a pro aplikaci v režimu master-slave je vhodné použít hřebeny v třídách kvality 5, 5H a 6.

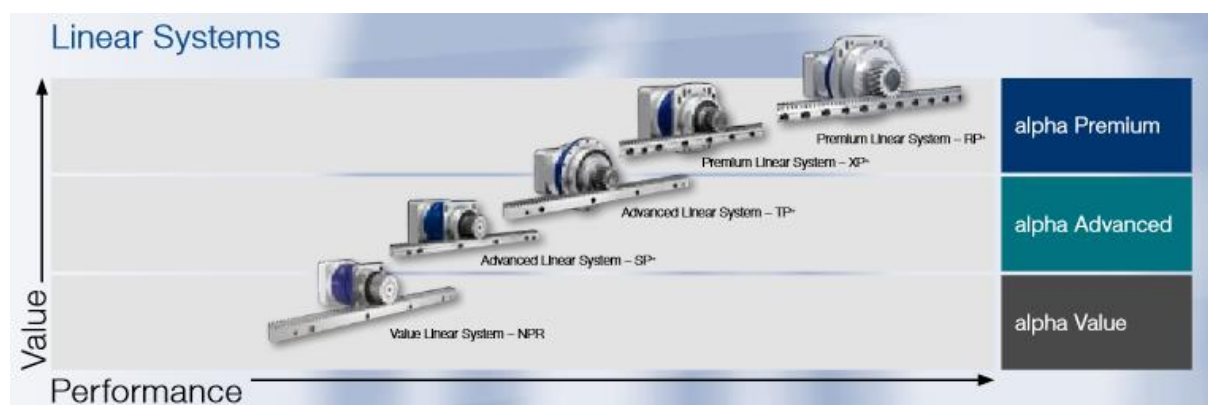


Obr. 34) Ozubené hřebeny Apex Dynamics [59]

### 3.4.3 Planetové převodovky, pastorky a hřebeny Wittenstein Group

Společnost Wittenstein vyvíjí produkty přizpůsobené potřebám zákazníků, systémová řešení pro vysoce dynamický pohyb, maximálně přesné polohování a inteligentní sítě pro technologii mechatronických<sup>9</sup> pohonů [61].

Dceřiná společnost – Wittenstein Alpha nabízí základní, pokročilé a prémiové řady převodovek včetně převodovek planetových (obr. 35). Také nabízí kompletní řešení lineárních pohonů – pastorek a hřeben. K tomuto řešení je možné použít několik dodávaných planetových převodovek [62], [61].



Obr. 35) Lineární systémy Wittensteihn Alpha [62]

<sup>9</sup> Mechatronika – spojení mechaniky, elektrotechniky a IT oborů

Vhodné planetové převodovky pro použití pastorku s hřebenem jsou převodovky označené NPR, SP+, TP+ XP+ a RP+ dle označení firmy Wittenstein. Wittenstein Alpha také dodává 4 druhy pastorků s šikmým ozubením (RMK, RMS, RMF, RMW). Pastorky označené jako RMK – pastorek s drážkou pro pero, RMS pastorek s vnitřním drážkováním (DIN 5480) (Obr. 36), RMF pastorek montovaný na přírubu, RMW pastorek se speciálním typem montáže na hřídel.



Obr. 36) RMS – pastorek s přímým drážkováním (dle DIN 5480) [62].

Planetové převodovky řady NPR jsou k dostání v 5 variantách jako jednostupňové, dvoustupňové a třístupňové. Jedná se o základní řadu převodovek. Některé jejich technické parametry jsou shrnuty v následující tabulce:

Tab 3) Základní řada lineárních systémů VLS (Obr. 37) [62]

<b>Systém</b>	<b>VLS 2</b>	<b>VLS 3</b>	<b>VLS 4</b>	<b>VLS 6</b>	<b>VLS 8</b>
<b>Planetová Převodovka</b>	NPR 015 MF	NPR 025 MF	NPR 035 MF	NPR 035 MF	NPR 045 MF
<b>Max. posuvová síla F</b>	1 890 N	3 220 N	4 300 N	6 150 N	8 000 N
<b>Max. rychlost (v<sub>max</sub>)</b>	253 m/min	342 m/min	347 m/min	400 m/min	160 m/min
<b>Převodový poměr (i)</b>	3-100	3-100	3-100	3-100	5-100
<b>Modul (m)</b>	1,5 mm	2 mm	2 mm	3 mm	3 mm
<b>Počet zubů (z)</b>	19	22	26	20	20



Obr. 37) Planetová převodovka řady NPR pro systém VLS Wittenstein Alpha [62]



Pokročilá řada převodovek SP+ a TP+ v lineárních systémech označených jako ALS je svými vlastnostmi o úroveň výše než základní řada NPR. Je však také nákladnější. Lineární systém ALS je v kombinaci s převodovkami typu SP+ nebo TP+.

Tab 4) Pokročilá řada lineárních systémů ALS [62]

Systém	ALS 2	ALS 3	ALS 6	ALS 8	ALS 12
<b>Planetová Převodovka</b>	SP+ 060R MF	SP+075R MF	SP+100R MF	SP+140R MF	SP+180 MF
<b>Max. posuvová síla F</b>	2 230 N	3 250 N	6 040 N	8 600 N	12 500 N
<b>Max. rychlost (v<sub>max</sub>)</b>	250 m/min	300 m/min	281 m/min	333 m/min	160 m/min
<b>Převodový poměr (i)</b>	3-100	3-100	3-100	3-100	5-100
<b>Modul (m)</b>	2 mm	2 mm	2 mm	3 mm	4 mm
<b>Počet zubů (z)</b>	15	18	23	20	20

Tab 5) Pokročilá řada lineárních systémů ALS s motory TP+ [62]

Systém	ALS 1	ALS 2	ALS 3	ALS 12	ALS 20
<b>Planetová Převodovka</b>	TP+ 004 MF	TP+ 010 MF	TP+ 025 MF	TP+ 050 MF	TP+ 110 MF
<b>Max. posuvová síla F</b>	1 370 N	2 500 N	3 600 N	11 800 N	19 700 N
<b>Max. rychlost (v<sub>max</sub>)</b>	325 m/min	412 m/min	367 m/min	438 m/min	570 m/min
<b>Převodový poměr (i)</b>	4-100	4-100	4-100	4-100	4-100
<b>Modul (m)</b>	2 mm	2 mm	2 mm	3 mm	4 mm
<b>Počet zubů (z)</b>	26	33	40	35	38

Tab 6) Pokročilá řada lineárních systémů ALS s motory TP+ [62]

Systém	ALS 4	ALS 11	ALS 21
<b>Planetová Převodovka</b>	TP+ 025 MA	TP+ 050 MA	TP+ 110 MA
<b>Max. posuvová síla F</b>	4 200 N	10 900 N	21 000 N
<b>Max. rychlost (v<sub>max</sub>)</b>	45 m/min	57 m/min	68 m/min
<b>Převodový poměr (i)</b>	22-220	22-220	22-220
<b>Modul (m)</b>	2 mm	3 mm	4 mm
<b>Počet zubů (z)</b>	20	20	20

Parametry prémiové řady označené jako PLS dle tabulky:

Tab 7) Prémiová řada lineárních systémů PLS [62]

<b>Systém</b>	<b>PLS 5</b>	<b>PLS 8</b>	<b>PLS 11</b>
<b>Planetová Převodovka</b>	XP+020RMF	XP+030RMF	XP+040RMF
<b>Max. posuvová síla (F)</b>	5 450 N	8 350 N	10 700 N
<b>Max. rychlost (v<sub>max</sub>)</b>	333 m/min	244 m/min	333 m/min
<b>Převodový poměr (i)</b>	3-100	3-100	3-100
<b>Modul (m)</b>	2 mm	2 mm	3 mm
<b>Počet zubů (z)</b>	20	20	20

Tab 8) Prémiová řada lineárních systémů PLS [62]

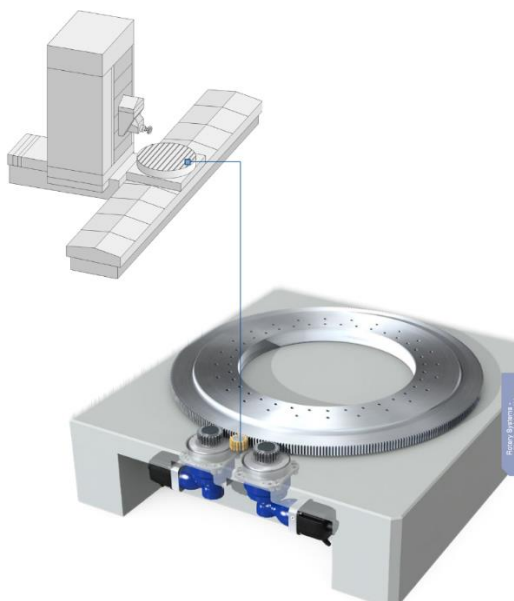
<b>Systém</b>	<b>PLS 10</b>	<b>PLS 13</b>	<b>PLS 20</b>	<b>PLS 22</b>	<b>PLS 36</b>
<b>Planetová Převodovka</b>	RP+ 030 MA	RP+ 030 MA	RP+ 040 MF	RP+ 040 MA	RP+ 050 MA
<b>Max. posuvová síla F</b>	9 750 N	12 900 N	20 300 N	22 300 N	36 100 N
<b>Max. rychlost (v<sub>max</sub>)</b>	133 m/min	200 m/min	250 m/min	104 m/min	112 m/min
<b>Převodový poměr (i)</b>	5,5	5,5	4-100	16-220	16-220
<b>Modul (m)</b>	2 mm	3 mm	3 mm	4 mm	4 mm
<b>Počet zubů (z)</b>	20	20	20	20	24

Tab 9) Prémiová řada lineárních systémů PLS [62]

<b>Systém</b>	<b>PLS 47</b>	<b>PLS 75</b>	<b>PLS 112</b>
<b>Planetová převodovka</b>	RP+ 050 MA	RP+ 060 MA	RP+ 080 MA
<b>Max. posuvová síla F</b>	47 000 N	75 000 N	20 300 N
<b>Max. rychlost (v<sub>max</sub>)</b>	135 m/min	91 m/min	111 m/min
<b>Převodový poměr (i)</b>	2-3	2-3	2-3
<b>Modul (m)</b>	5 mm	6 mm	8 mm
<b>Počet zubů (z)</b>	23	23	21

Úhel stoupání šroubovice všech pastorků je vždy levý. Délky hřebenů jsou standardně 1000 mm, ale k dostání jsou i kratší varianty (500 mm) nebo delší varianty (2000 mm).

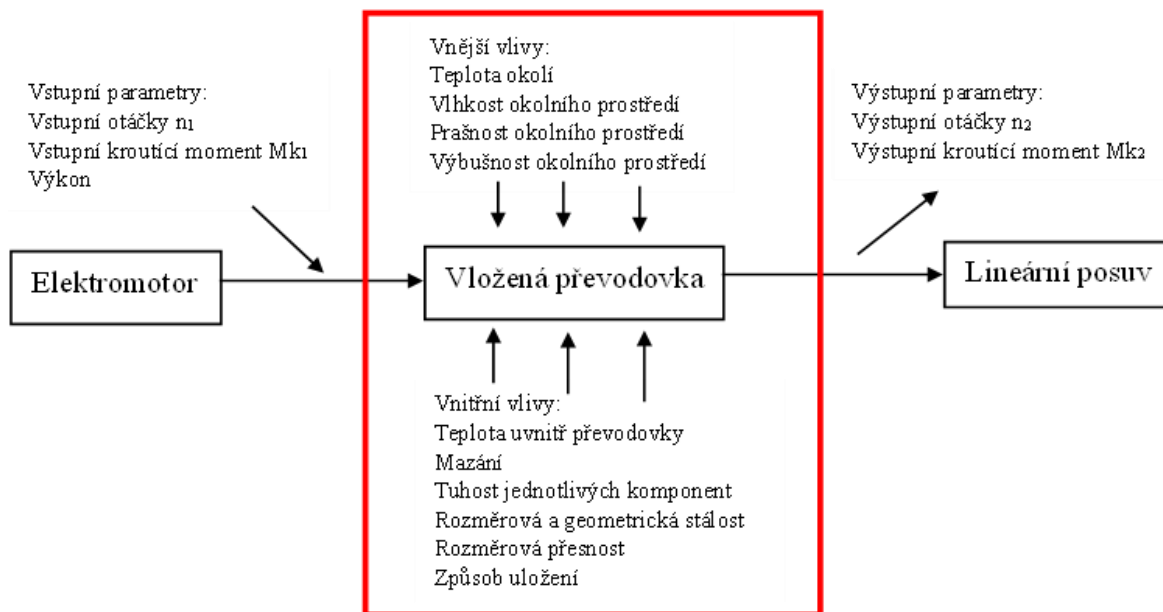
Wittenstein Alpha také nabízí poměrně netradiční rotační systém (obr. 38).



Obr. 38) Rotační systém společnosti Wittenstein Alpha [62]

### 3.5 Systémový rozbor řešené problematiky

Vymezení řešeného systému je patrné z obrázku níže.



Obr. 39) Vymezení řešené problematiky



Tab 10) Systém podstatných veličin

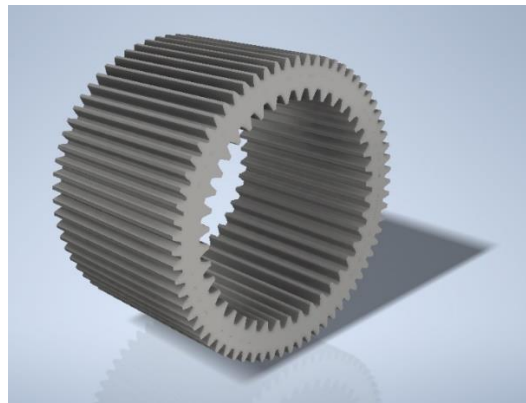
Charakteristika	Veličiny, parametry	Doplňující údaje
<b>CH 1 - Vstupní a výstupní parametry, celkové rozměry, celková hmotnost</b>	Vstupní otáčky, kroutící moment	
	Výstupní otáčky, kroutící moment	
	Rozměry převodovky	
	Hmotnost převodovky	
<b>CH 2 - Jednotlivé komponenty, podsestavy, sestavy a jiné dílčí celky</b>	Volba jednotlivých komponent	
	Volba jednotlivých normalizovaných komponent	
	Materiál jednotlivých komponent	
	Rozměry jednotlivých komponent	
	Hmotnost jednotlivých komponent	
<b>CH 3 - Uložení, tuhost, únosnost, mazání</b>	Tuhost jednotlivých komponent typu hřídel	
	Silové zatížení ozubených kol	
	Statická a dynamická únosnost jednotlivých ložisek	
	Uložení jednotlivých ozubených kol	
	Uložení jednotlivých ložisek a hřídelí	
	Mazání jednotlivých komponent	
<b>CH 4 - Smontovatelný, výrobitelnost, výrobní náklady</b>	Vyrobitelnost jednotlivých komponent	Je-li možné za přípustných podmínek každý jednotlivou komponentu vyrobit
	Smontovatelné jednotlivé komponenty, podsestavy a sestavy	Je-li možné všechny komponenty, podsestavy a sestavy za běžných podmínek smontovat
	Cena jednotlivých komponent	
	Cena montáže	
<b>CH 5 - Emise převodovky</b>	Hluk	Hluk, který vydává převodovka
	Vibrace	
	Zahřívání během provozu	Teplo vznikající během činnosti převodovky od jednotlivých komponentů
<b>CH 6 - Vlivy prostředí</b>	Teplota	Teplota prostředí, ve kterém se převodovka používá
	Vibrace	Vibrace od vnějších zdrojů (například vlaková nebo automobilová doprava v bezprostřední vzdálenosti)
	Vlhkost prostředí	
	Prašnost prostředí	

# 4 NÁVRH NOVÉ KONCEPCE PLANETOVÉHO PŘEVODU

## 4.1 Návrhy jednotlivých variant

Náhon bude realizován přes planetovou převodovku na vedení typu ozubený hřeben a pastorek. Centrální kolo (na obrázku červené) bude vetknuté do skříně převodovky, takže bude pevné. Satelity a korunové kolo budou pohyblivé. Unášec satelitu bude pevně spojen s výstupní hřídelí na motoru. Nová koncepce spočívá v navržení ozubeného kola, které má současně vnější i vnitřní ozubení (obr. 41). Díky tomuto návrhu bude realizován převod a zároveň bude převodovka převádět rotační pohyb na pohyb translační. Celá převodovka pak pohání příčnick.

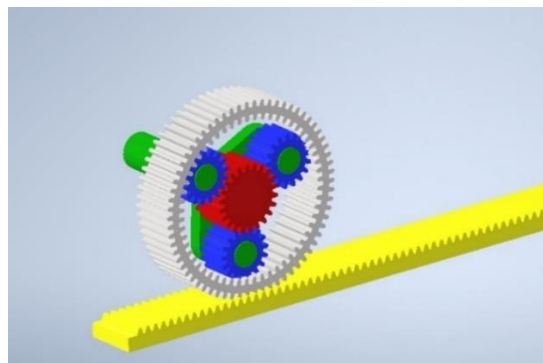
Návrh výroby korunového kola: odlévání, protahování, obrážení, SLS tisk<sup>10</sup>, svařování a drátování [2].



Obr. 41) Ozubené kolo s vnějším a vnitřním ozubením

### Varianta S1 (obr. 42)

Centrální kolo (červené) bude vetknuté do skříně převodovky. Zelený unášec bude napojený na elektromotor, který bude roztáčet satelity. Satelity (modré) se otáčejí kolem svých os a také kolem osy centrálního kola. Při tomto pohybu otáčejí také korunovým kolem s vnitřním a vnějším ozubením. Díky hřebenu tak korunové kolo převádí rotační pohyb na pohyb translační.

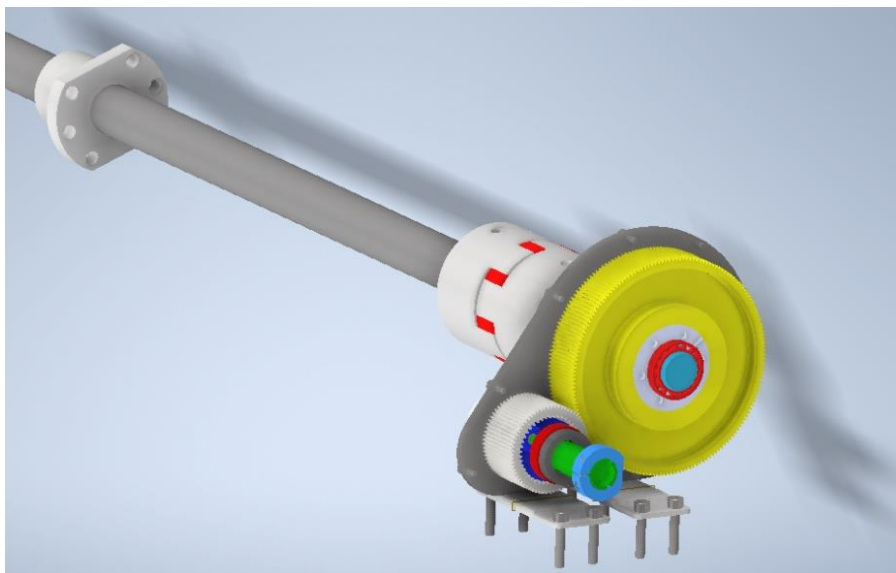


Obr. 42) Ozubený hřeben a planetová převodovka v jednom (varianta S1)

<sup>10</sup> Při použití SLS tisku je nutné provést na kole dokončovací operaci ke zlepšení kvality povrchu kola

### Varianta S2 (obr. 43)

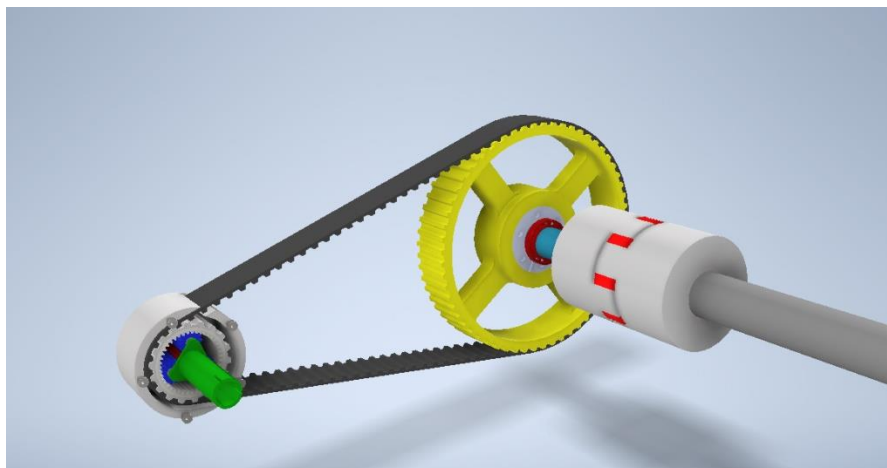
Centrální kolo (červené) bude vetknuté do skříně převodovky. Zelený unašeč bude napojený na elektromotor, který bude roztáčet satelity (modré). Satelity se otáčejí kolem svých os a také kolem osy centrálního kola. Při tomto pohybu otáčejí také korunovým kolem s vnitřním a vnějším ozubením. Vnější ozubení korunového kola je v převodu s větším kolem (na obrázku žluté), které pohání kuličkový šroub s maticí.



Obr. 43) Dvojité ozubené kolo s převodem (varianta S2)

### Varianta S3 (obr. 44)

Jedná se o převod s ozubeným řemenem. Centrální kolo (červené) bude opět vetknuté do skříně převodovky. Zelený unašeč bude napojený na elektromotor, který bude roztáčet satelity (modré). Satelity se otáčejí kolem svých os a také kolem osy centrálního kola. Při tomto pohybu otáčejí také korunovým kolem s vnitřním a vnějším ozubením pro ozubený řemen. Na vnější straně korunového kola není klasické normalizované ozubení pro přímý převod, ale jsou na něm zuby pro ozubený řemen. Z toho plyne, že menší řemenice (šedá) je korunové kolo s vnitřním ozubením a je v převodu s větší řemenicí (žlutá), která pohání kuličkový šroub s maticí.



Obr. 44) Převod s ozubeným řemenem (varianta S3)

## 4.2 Předběžný výpočet

Všechny výpočty byly provedeny dle dostupné literatury uvedené ve zdrojích [1], [4], [7], [63], [64], [65], [66], [67], [68], [69] dále dle ČSN 01 4686:1988. Jmenovité otáčky elektromotoru jsou  $n_e = 2\,000$  otáček za minutu. Zvolíme počet zubů na centrálním kole  $z_1 = 12$  zubů. Satelity budou 3 ( $a_k=3$ ) s počtem  $z_2 = 15$  zubů.

Vypočítáme počet zubů dle rovnice (1) na korunovém kole označeném ve výpočtech indexem 3. Zároveň se jedná o první geometrickou podmínku planetového mechanismu.

$$z_3 = z_1 + 2 \times z_2 = 12 + 2 \times 15 = 42 \quad (1)$$

Jedná se o vnitřní ozubené kolo, které bude mít 42 zubů. Modul byl zvolen  $m=1$  [1]. Uvažujeme obvyklý úhel záběru  $\alpha_w = 20^\circ$  [2], značený též pouze jako  $\alpha$ .

Rozměry jednotlivých kol se vypočítají dle rovnic (3), (4) a (5).

Průměr roztečné kružnice centrálního kola označené indexem 1 se spočítá dle rovnice (2).

$$d_1 = z_1 \times m = 12 \times 1 = 12 \text{ mm} \quad (2)$$

Průměr roztečné kružnice satelitu označený indexem 2 se spočítá dle rovnice (3).

$$d_2 = z_2 \times m = 15 \times 1 = 15 \text{ mm} \quad (3)$$

Průměr roztečné kružnice korunového kola označeného indexem 3 se spočítá dle rovnice (4).

$$d_3 = -z_3 \times m = -42 \times 1 = -42 \text{ mm} \quad (4)$$

(Pokud se počítá vnitřní ozubení, používá se záporný počet zubů. V dalších výpočtech, ve kterých je podstatná velikost, je vhodné použít výsledek v absolutní hodnotě.)

Osová vzdálenost se spočítá dle rovnice (5).

$$a_{12} = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{12 + 15}{2} = 13,5 \text{ mm} \quad (5)$$

Druhá podmínka planetového mechanismu je dle rovnice (6). Výsledek rovnice musí být celé číslo.

$$N = \frac{z_1 + z_3}{a_k} = \frac{12 + 42}{3} = 18 \quad (6)$$

Otáčky korunového kola se vypočítají dle rovnice (7).

$$n_3 = n_e \times \left( \frac{|d_3| + d_1}{|d_3|} \right) = 2\,000 \times \left( \frac{|-42| + 12}{|-42|} \right) = 2\,571,43 \text{ min}^{-1} \quad (7)$$

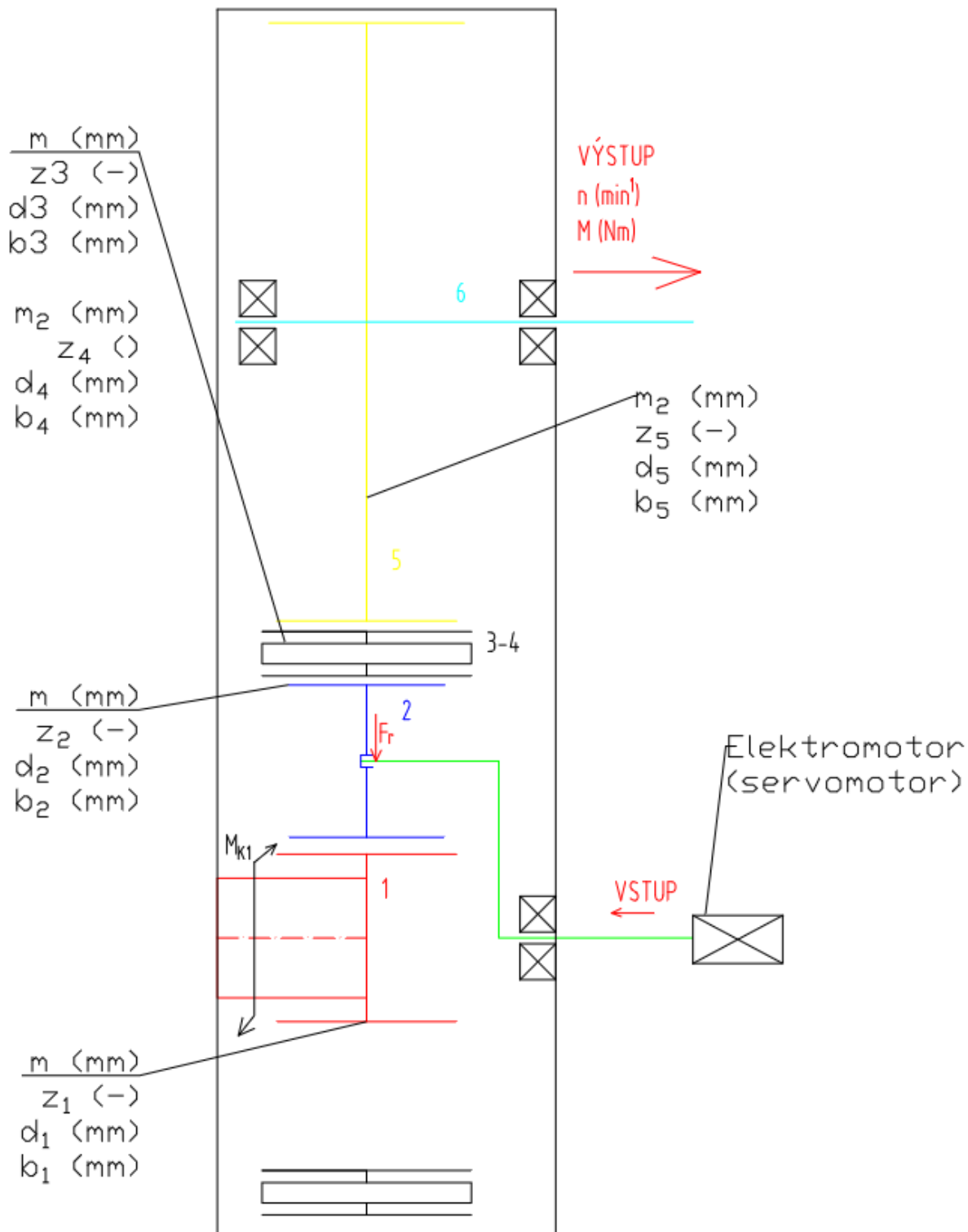
Z předběžných výpočtů je zřejmé, že tento typ převodu otáčky zvyšuje, takže celý mechanismus zrychluje a jedná se tedy o multiplikátor. Pokud by byl použit mechanismus ve variantě S1 (obr. 42) Obr. 42), jeho použití by bylo vhodné pro dřevoobráběcí stroje a pro



stroje  
na obrábění slitin z lehkých kovů.

### 4.3 Návrh varianty S2

#### 4.3.1 Schematické znázornění varianty S2 řešené planetové převodovky



Obr. 45) Rozdělení konstrukčních uzlů potřebných pro výpočet

### 4.3.2 Výpočty pro variantu S2

V hlavním textu práce jsou zmíněny pouze vybrané výpočty, všechny ostatní výpočty včetně zde uvedených jsou v příložené dokumentaci. Volba a výpočty jednotlivých koeficientů jsou také k dispozici v příložené dokumentaci.

Vstupní parametry:

Jmenovité vstupní otáčky:  $n_e = 2000 \text{ min}^{-1}$

Jmenovitý kroutící moment:  $M_{Ke} = 20 \text{ Nm}$

Stupeň přesnosti dle ISO:  $Q_{ISO} = 5$  (přesnost převodů obráběcích strojů [2])

#### Návrh geometrických rozměrů a kinematické poměry

Volba počtu zubů na centrálním kole  $z_1=12$  zubů. Satelity budou 3 ( $a_k=3$ ) s počtem  $z_2 = 15$  zubů. Vypočítáme počet zubů dle rovnice (8) na korunovém kole označeném ve výpočtech indexem 3. Zároveň se jedná o první geometrickou podmínku planetového mechanismu.

$$z_3 = z_1 + 2 \times z_2 = 12 + 2 \times 15 = 42 \quad (8)$$

Jedná se o vnitřní ozubené kolo, které bude mít 42 zubů. Modul byl zvolen  $m=1$ . Uvažujeme obvyklý úhel záběru  $\alpha_w = 20^\circ$  [2].

Rozteč ozubení se spočítá dle rovnice 9.

$$p = \pi \times m = 3,14 \times 1 = 3,14 \text{ mm} \quad (9)$$

Tloušťka zubu se stanoví dle rovnice 10

$$s = \frac{p}{2} = \frac{3,14}{2} = 1,57 \text{ mm} \quad (10)$$

Šířka zubové mezery se stanoví z rovnice (11)

$$e_s = s = \frac{3,14}{2} = 1,57 \text{ mm} \quad (11)$$

Hlavová vůle se vypočítá dle rovnice (12)

$$c = 0,25 \times m = 0,25 \times 1 = 0,25 \text{ mm} \quad (12)$$

Rozměry jednotlivých kol se vypočítají dle rovnic (13), (14) a (15).

Průměr roztečné kružnice centrálního kola označené indexem 1 se spočítá dle rovnice (13).

$$d_1 = z_1 \times m = 12 \times 1 = 12 \text{ mm} \quad (13)$$

Průměr roztečné kružnice satelitu označený indexem 2 se spočítá dle rovnice (14).

$$d_2 = z_2 \times m = 15 \times 1 = 15 \text{ mm} \quad (14)$$

Průměr roztečné kružnice korunového kola označené indexem 3 se spočítá dle rovnice (15).

$$d_3 = -z_3 \times m = -42 \times 1 = -42 \text{ mm} \quad (15)$$

(Pokud se počítá vnitřní ozubení, používá se záporný počet zubů. V dalších výpočtech, ve kterých je podstatná velikost, je vhodné použít výsledek rovnice (15) v absolutní hodnotě.)

Průměr patní kružnice korunového kola se stanoví z rovnice (16).

$$d_{f3} = d_3 - 2 \times (m + c) = -42 - 2 \times (1 + 0,25) = -44,5 \text{ mm} \quad (16)$$

Osová vzdálenost se spočítá dle rovnice (17).

$$a_{12} = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{12 + 15}{2} = 13,5 \text{ mm} \quad (17)$$

Druhá podmínka planetového mechanismu je dle rovnice (18). Výsledek rovnice musí být celé číslo.

$$N = \frac{z_1 + z_3}{a_k} = \frac{12 + 42}{3} = 18 \quad (18)$$

Otáčky korunového kola se vypočítají dle rovnice (19).

$$n_3 = n_e \times \left( \frac{|d_3| + d_1}{|d_3|} \right) = 2000 \times \left( \frac{|-42| + 12}{|-42|} \right) = 2\,571,43 \text{ min}^{-1} \quad (19)$$

#### Vnější ozubení na korunovém kole

Z iteračních a optimalizačních výpočtů plyne, že nejvhodnější bylo zvolit modul pro vnější ozubení  $m_2 = 0,8 \text{ mm}$ .

Rozteč ozubení se spočítá rovněž dle rovnice (9) a (20).

$$p_2 = \pi \times m_2 = 3,14 \times 0,8 = 2,51 \text{ mm} \quad (20)$$

Počet zubů na vnější straně korunového kola  $z_4 = 68$ . Počet zubů je zvolený tak, aby věnec korunového kola nebyl menší než  $3,5 \times 0,8 = 2,8 \text{ mm}$ .

Průměr roztečné kružnice vnějšího ozubení označené indexem 4 se stanoví z rovnice (21).

$$d_4 = z_4 \times m_2 = 59 \times 0,8 = 47,2 \text{ mm} \quad (21)$$

Takže platí:

$$\frac{d_{f4} - |d_{f3}|}{2} > 3,5 \times m_2; \quad \frac{52,3 - |44,5|}{2} > 3,5 \times m_2; \quad 3,9 > 2,8 \quad (22)$$

Počet zubů na posledním výstupním kole byl zvolen 171 ( $z_5 = 171$ ).

Průměr roztečné kružnice vnějšího ozubení označené indexem 4 se stanoví z rovnice (23).

$$d_5 = z_5 \times m_2 = 171 \times 0,8 = 136,8 \text{ mm} \quad (23)$$

Osová vzdálenost mezi středem korunového kola a výstupním 5. kolem převodové skříně je dle rovnice (24).

$$a_{45} = \frac{d_4 + d_5}{2} = \frac{47,2 + 121,6}{2} = 95,6 \text{ mm} \quad (24)$$

Otáčky kuličkového šroubu s maticí můžeme určit z rovnice (25).

$$n_{KSM} = \frac{d_4}{d_5} \times n_3 = \frac{47,2}{136,8} \times 2\,571,43 = 1022,56 \text{ min}^{-1} \quad (25)$$

Převodový poměr mezi korunovým kolem a výstupním kolem je dle rovnice (26).

$$i_{35} = \frac{n_3}{n_{KSM}} = \frac{2\,571,43}{1022,56} = 2,5 \quad (26)$$

Celkový převodový poměr můžeme pak stanovit dle rovnice (27).

$$i_c = \frac{n_e}{n_{KSM}} = \frac{2\,000}{1\,022,56} = 1,96 \cong 2 \quad (27)$$

3. Geometrická podmínka planetového mechanismu – minimální vůle mezi satelity by měla být 1 až 2 mm.

$$v_{min} = 1 \text{ mm}$$

Potom tedy platí rovnice (28).

$$\theta_{min} = 2 \times \arcsin\left(\frac{d_{a2} + v_{min}}{d_{w1} + d_{w2}}\right) = 2 \times \arcsin\left(\frac{17 + 1}{12 + 15}\right) = 83,6^\circ \quad (28)$$

$d_{a2}$  – průměr hlavové kružnice satelitu;

$d_{w1}$  – průměr valivé kružnice centrálního kola;

$d_{w2}$  – průměr valivé kružnice satelitu.

3. Podmínka planetového mechanismu dle rovnice (29 a 30).

$$\theta = \frac{360^\circ}{a_k} = \frac{360^\circ}{3} = 120^\circ \quad (29)$$

$$\theta > \theta_{min} ; 120^\circ > 83,6^\circ \quad (30)$$

Podmínka je splněna.

### Silové poměry

Silové poměry udávají výstupní kroutící moment a zároveň jsou základními vstupními parametry pro výpočty únosnosti jednotlivých zubů, celého soukolí a dalších výpočtů potřebných vzhledem k bezpečnosti k mezním stavům.

Jmenovitý kroutící moment se vypočítá dle rovnice (31).

$$M_{K2} = \frac{M_{Ke}}{a_k} = \frac{20}{3} = 6,67 \text{ Nm} \quad (31)$$

Zatížení od obvodové síly v planetovém mechanismu můžeme stanovit dle rovnice (32).

$$F_{t2} = \frac{2 \times M_{K2}}{d_2} = \frac{2 \times 6,67}{15 \times 10^{-3}} = 888,89 \text{ N} \quad (32)$$

Radiální sílu pak můžeme určit dle rovnice (33).

$$F_{r2} = F_{t2} \times \tan \alpha = 888,89 \times \tan 20^\circ = 323,53 \text{ N} \quad (33)$$

Výstupní kroutící moment na kuličkovém šroubu s maticí podle rovnice (34).

$$M_{KSM} = i_c \times M_{Ke} = 1,96 \times 20 = 39,12 \text{ Nm} \quad (34)$$

Zatížení od obvodové síly na výstupním kole označeném indexem 5 můžeme stanovit dle rovnice (35).

$$F_{t5} = \frac{2 \times M_{KSM}}{d_5} = \frac{2 \times 39,12}{136,8} = 571,9 \text{ N} \quad (35)$$

Radiální sílu na výstupním kole pak můžeme určit dle rovnice (36).

$$F_{r5} = F_{t5} \times \tan \alpha = 571,9 \times \tan 20^\circ = 208,15 \text{ N} \quad (36)$$

### Výpočty pro ověření bezpečnosti vzhledem k mezním stavům

Výpočet kroutícího momentu unašeče se spočítá dle rovnice (37).

$$M_{KU} = \frac{M_{Ke}}{a_k} = \frac{20}{3} = 6,67 \text{ Nm} \quad (37)$$

Radiální síla v uložení satelitu se stanoví z rovnice (38).

$$F_{tU} = \frac{M_{KU}}{a_{12}} = \frac{6,67}{13,5 \times 10^{-3}} = 493,83 \text{ N} \quad (38)$$

Průměr čepu v satelitu  $d_{2\check{c}} = \Phi 5 \text{ mm}$ .

Výpočet napětí ve střihu z rovnice (39).

$$\tau_s = \frac{4 \times F_{tU}}{\pi \times d_{2\check{c}}} = \frac{4 \times 493,83}{\pi \times 5 \times 10^{-3}} = 25,15 \text{ MPa} \quad (39)$$

Mez kluzu pro ocel E295 (11 500) je  $R_e = 285 \text{ MPa}$ . Mez kluzu ve smyku  $R_{SE} = 0,577 \times R_e$   
 $R_{SE} = 164,44 \text{ MPa}$

Návrhový součinitel byl zvolen  $k_n = 2$

Kontrolní výpočet čepu vzhledem k meznímu stavu na střih je dle rovnice (40 a 41).

$$\frac{R_{SE}}{k_n} = \frac{164,44}{2} = 82,22 \text{ MPa} \quad (40)$$

$$\frac{R_{SE}}{k_n} > \tau_s \quad (41)$$

Podmínka je splněna.

#### Kontrola čepu na otláčení

Z rovnice (42) se určí měrné zatížení.

$$p_m = \frac{F_{tU}}{d_{2\check{c}} \times b_{2kl}} = \frac{493,83}{5 \times 10^{-3} \times 10 \times 10^{-3}} = 9,88 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (42)$$

$b_{2kl}$  – šířka kluzného ložiskového pouzdra.

Dovolené měrné zatížení pro vybrané ložisko z katalogu SKF je  $80 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ , podmínka je tedy splněna.

#### Kontrola na zatížení krutem vetknutého centrálního kola (viz obr. 49 a obr. 50)

Kontrola byla provedena v CAD softwaru Solidworks pomocí MKP a je součástí příloh. V hlavním textu práce jsou uvedeny pouze výsledky, kterých bylo dosaženo.

#### Výstupní parametry pro kuličkový šroub s maticí

Výstupní síla KŠM se určí z rovnice (43)

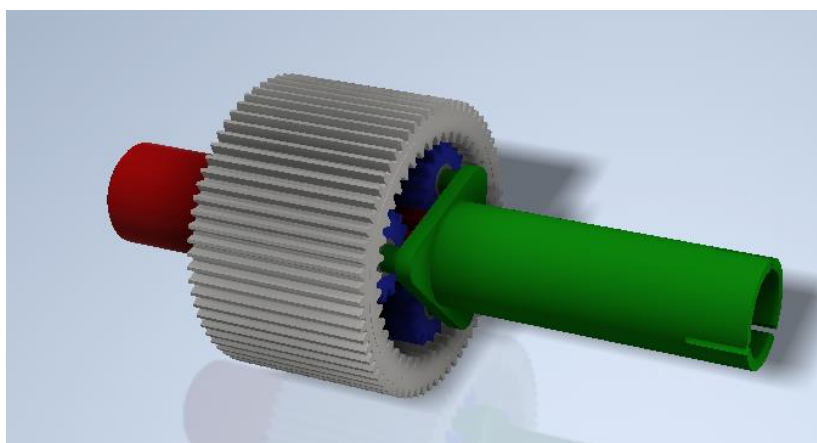
$$F_{KSM} = \frac{M_{KSM} \times 2 \times \pi}{s_{KSM}} \times \eta_c = \frac{39,12 \times 2 \times \pi}{10 \times 10^{-3}} \times 0,8 = 19662,7 \text{ N} \quad (43)$$

$s_{KSM} \text{ (mm)}$  - stoupání KŠM;

$\eta_c \text{ (-)}$  – účinnost KŠM.

### 4.3.3 Konstrukční uzel jedna a dva

Základním prvkem prvního konstrukčního uzlu je podsestava označená jako první převod. Tato podsestava se skládá z vetknutého centrálního kola, 3 satelitů, 6 kluzných ložiskových pouzder, unašeče elektromotoru (obr. 46). Vstupní délka unašeče a jeho další parametry jsou volbou potencionálního zákazníka, zde je uvedena pouze jedna z možných variant. Unašeč je svařenec z konstrukční oceli. Do vnitřního průměru se nasune výstupní hřídel elektromotoru a stahovacím pouzdrem<sup>11</sup> (na obr. 48 světle modré) se stáhne tak, aby nedošlo ke spojení s vůlí. Na druhém konci jsou k unašeči navařené 3 čepy, na kterých jsou 3 satelity planetového převodu (na obrázku modré). V satelitech jsou nalisována kluzná ložisková pouzdra – PCM 050710 E od společnosti SKF [70]. Axiální pohyb satelitů je zajištěn pomocí pojistných hřídelových kroužků (ČSN 02 2929–4 [8]).



Obr. 46) První převod

Tab 11) Kusovník prvního převodu

Položka	KS	Číslo součásti	Popis	Cena <sup>12</sup> (Kč/MJ)
1	1	DP-01-01-24	Centrální kolo 1	413
2	3	DP-01-02-24	Satelit 2	70 (210)
3	1	DP-01-03/04-24	Kolo 3-4	550
4	1	DP-01-06-24	Unašeč	120
5	6	SKF PCM 050710_E	Ložisko kluzné	24,68 (148,08)
6	3	CSN 02 2929 - 4	Pojistné hřídelové kroužky	0,40 (1,20)

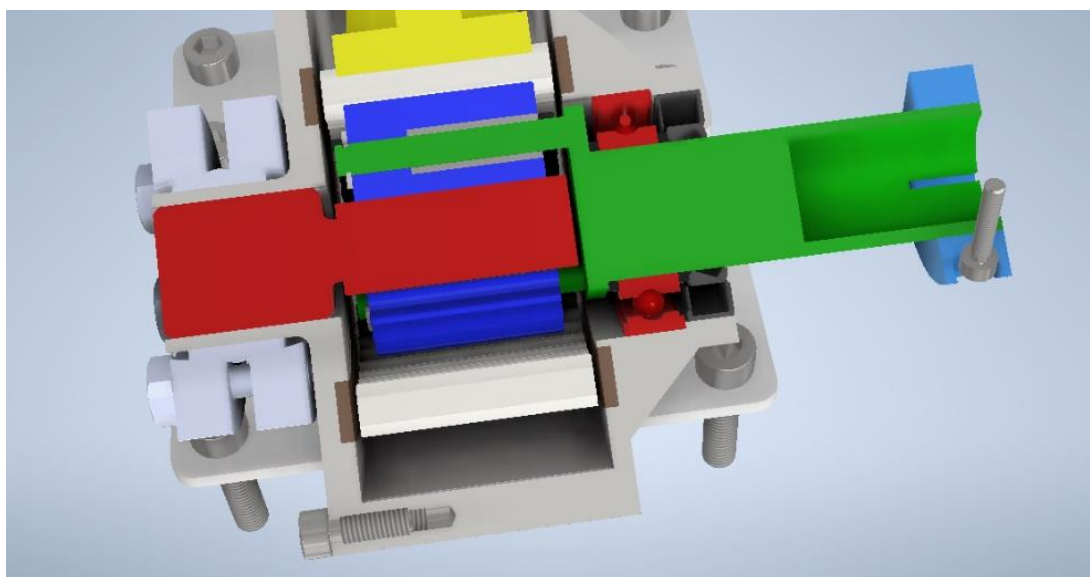
Celková částka dílů (bez montáže) pro první převod bude přibližně 1 442 Kč.

Konstrukční uzel jedna a dva se dále skládá ze stahovacího pouzdra, svěrného pouzdra tollok, 2 distančních kroužků, hřídelového těsnění a jednoho valivého ložiska. Červené centrální kolo na obrázku (obr. 47), je vetknuto do skříně převodovky a utaženo pomocí bezvůlového svěrného pouzdra tollok typ 603 – shrink disc [71]. Tento svěrný spoj přenesse

<sup>11</sup> Takovéto spojení je pouze jednou z možností. Může se využít i přesné hřídelové spojky nebo také pružné spojky. Konstrukce by se však prodražila, ale byla by přesnější a méně by zatěžovala připojený motor. Při použití stahovacího pouzdra při utahování může dojít k vyosení hřídele motoru a unašeče, a tím je i motor více namáhán. Použití svěrného pouzdra využívají většina výrobců planetových převodovek jako například Apex Dynamics [82].

<sup>12</sup> Cena je stanovena za jednici, musí se tedy ještě vynásobit počtem kusů v kusovníku

kroučící moment o velikosti 170 Nm. Ve skříni planetové převodovky bude také valivé ložisko – 61904 rovněž od společnosti SKF [72]. Tato vstupní díra je utěsněna guferem (na obrázku černé), kvůli možnému unikání maziva. Mezi ložiskem a guferem je distanční kroužek pro vymezení vzdálenosti jednotlivých prvků. Ve skříni a ve víku převodovky budou zalisovány bronzová pouzdra. Tato pouzdra (plošky) budou složít k tomu, kdyby se nějakým způsobem posunulo korunové kolo, aby se opřelo o bronzovou plošku, po které by mohlo také klouzat.



Obr. 47) První konstrukční uzel

Shrnutí výsledků konstrukčního uzlu označeného 1 ve schématu (obr. 45).

Tab 12) Vetknuté centrální kolo

Centrální kolo (1)	Veličina
Modul	1 mm
Počet zubů	12 (-)
Průměr roztečné kružnice $d_1$	$\Phi$ 12 mm
Šířka $b_1$	35 mm
Součinitel bezpečnosti v dotyku $S_{H1}^{13}$	1,11 (-)
Součinitel bezpečnosti v ohybu $S_{F1}^{14}$	8,05 (-)
Materiál	16MnCr5
Tvrдость dle HRC	62 (-)

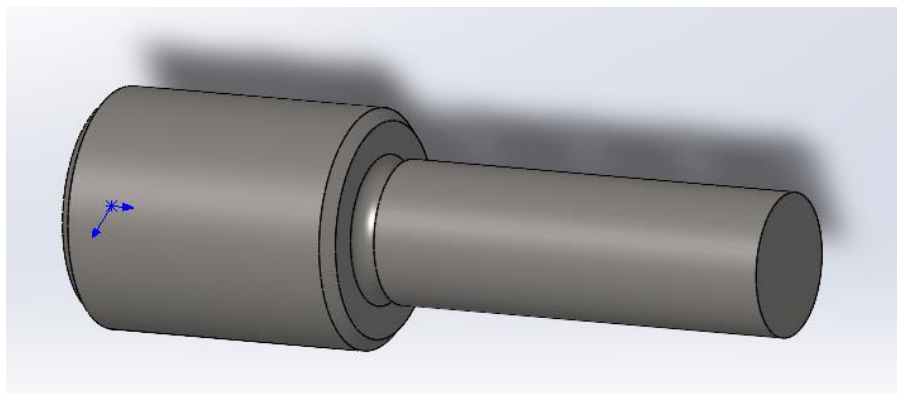
První centrální kolo může být z jednoho kusu, jeho obrobení bude ale náročnější. Další možnost zhotovení tohoto centrálního kola je ze dvou kusů. Hřídel prvního kusu by měla průměr patní kružnice ozubení ( $\Phi$  9,5 mm) a byla by zalisována za tepla do mezikruží o shodném vnitřním průměru a vnějším průměru  $\Phi$  20 mm. Centrální kolo s hřídelí je namáháno kombinovaným namáháním. Tzn.: je namáháno kroučícím momentem vyvolaným od obvodové

<sup>13</sup> Dle ČSN 01 4686 lze orientačně uvažovat tento součinitel 1,1-1,2 a více

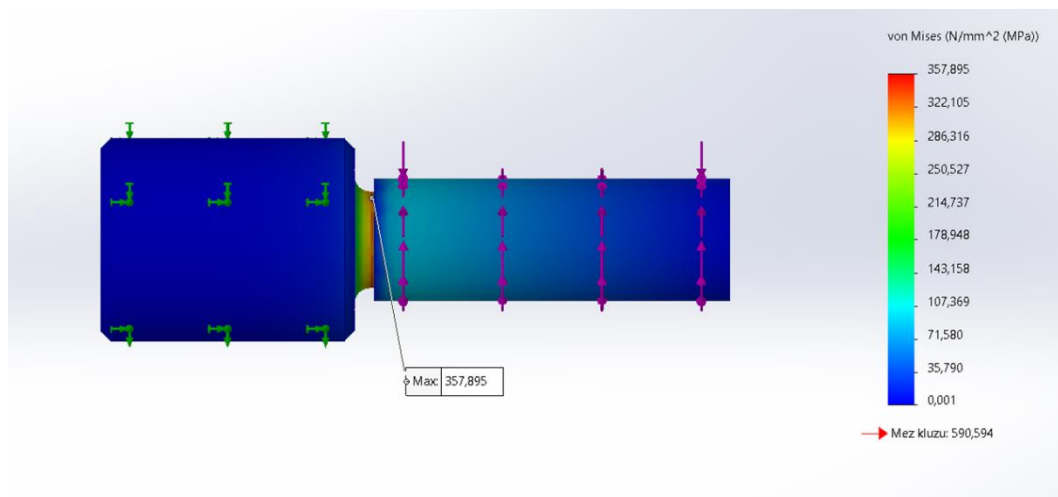
<sup>14</sup> Dle ČSN 01 4686 lze orientačně uvažovat tento součinitel 1,2 a více



síly mezi satelitem a pastorkem. Dále je centrální kolo namáháno radiální silou od výstupního kola. Řešení tohoto problému bylo provedeno pomocí metody konečných prvků v CAD softwaru Solidworks (viz obr. 48 a obr. 49).



Obr. 48) Zjednodušený model centrálního kola



Obr. 49) MKP (max 357,9 MPa)

Z výsledků je patrné, že maximální napětí bude o velikosti 357,9 MPa, mez kluzu oceli 16MnCr5 je 590,6 MPa. Bezpečnost vzhledem k meznímu stavu pružnosti lze spočítat jako mez kluzu vydělená maximálním napětím (viz příloha technické výpočty, výňatek obr. 49).

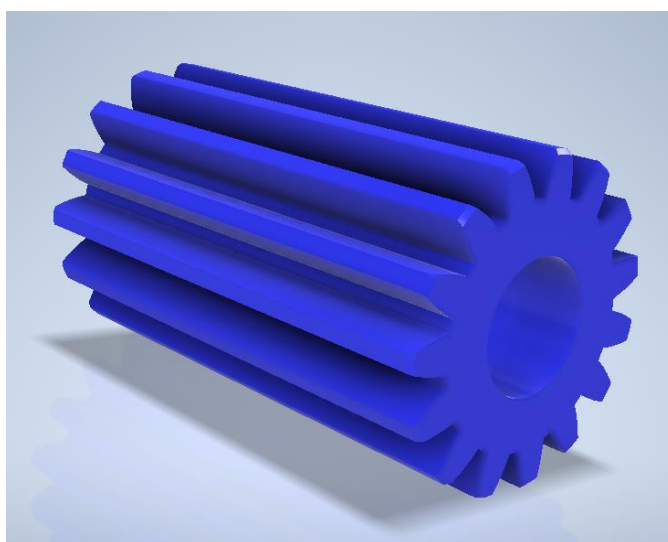
Tab 13) Vetknutá hřídel s ozubeným kolem

Vetknutá hřídel	Veličina
Průměr roztečné kružnice	Φ 12 mm
Průměr čepu	Φ 20 mm
Materiál	16MnCr5
Zatěžující kroutící moment	5,33 Nm
Zatěžující síla	208,15 N
Bezpečnost vzhledem k MSP	1,7

Shrnutí výsledků konstrukčního uzlu označeného 2 ve schématu (obr. 45) a (obr. 47)

Tab 14) Satelity (2)

Satelit	Veličina
Modul	1 mm
Počet zubů	15 (-)
Průměr roztečné kružnice $d_2$	$\Phi$ 15 mm
Šířka $b_2$	29 mm
Součinitel bezpečnosti v dotyku $S_{H2}$	1,47 (-)
Součinitel bezpečnosti v ohybu $S_{F2}$	6,83 (-)
Materiál	16MnCr5
Tvrдость dle HRC	62 (-)



Obr. 50) Satelit

Tab 15) Uložení satelitu (obr. 51) a unašeče

Čep v ložisku	Veličina
Průměr čepu	$\Phi$ 5 mm
Materiál	E295
Zatěžující kroutící moment	6,67 Nm
Napětí ve stříhu	25,15 MPa
Bezpečnost vzhledem k MSP ve stříhu	3,27

#### 4.3.4 Konstrukční uzel 3 a 4 – kolo s vnitřním a vnějším ozubením

Jedná se o kolo s vnitřním a vnějším ozubením (kolo 3-4). V této práci se uvažuje, že toto kolo je vyrobeno z jednoho kusu oceli 16MnCr5 (viz obr. 41). Satelity roztáčejí korunové kolo, a to pomocí vnějšího ozubení roztáčí výstupní kolo označené jako kolo 5.

Shrnutí výsledků konstrukčního uzlu označeného 3 (3-4) ve schématu (Obr. 45).

Tab 16) Vnitřní ozubení (3) korunového kola

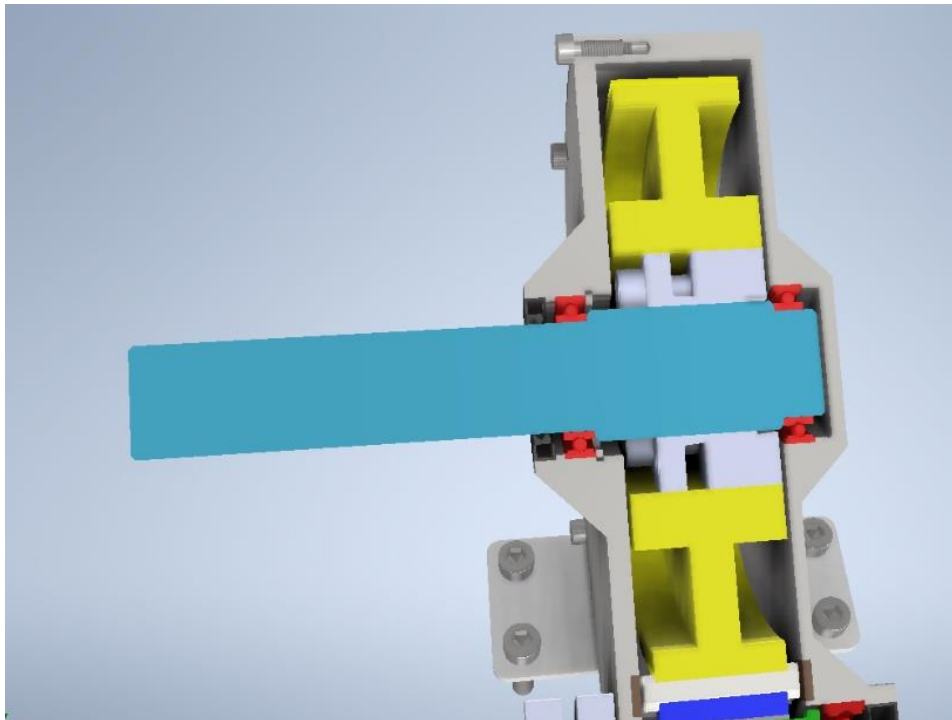
Korunové kolo – vnitřní ozubení	Veličina
<b>Modul</b>	1 mm
<b>Počet zubů</b>	42 (-)
<b>Průměr roztečné kružnice <math>d_3</math></b>	$\Phi$ 42 mm
<b>Šířka <math>b_3</math></b>	35 mm
<b>Součinitel bezpečnosti v dotyku <math>S_{H3}</math></b>	3,68 (-)
<b>Součinitel bezpečnosti v ohybu <math>S_{F3}</math></b>	9,79 (-)
<b>Materiál</b>	16MnCr5
<b>Tvrдость dle HRC</b>	62 (-)

Tab 17) Vnější ozubení (4) korunového kola

Korunové kolo – vnější ozubení	Veličina
<b>Modul</b>	0,8 mm
<b>Počet zubů</b>	68 (-)
<b>Průměr roztečné kružnice <math>d_4</math></b>	$\Phi$ 54,4 mm
<b>Šířka <math>b_4</math></b>	35 mm
<b>Součinitel bezpečnosti v dotyku <math>S_{H4}</math></b>	1,47 (-)
<b>Součinitel bezpečnosti v ohybu <math>S_{F4}</math></b>	12,12 (-)
<b>Materiál</b>	16MnCr5
<b>Tvrдость dle HRC</b>	62 (-)

#### 4.3.5 Konstrukční uzel 5 – výstupní konstrukční uzel

Pátý konstrukční uzel (výstupní konstrukční uzel – obr. 51) se skládá z výstupního kola (kolo 5 – na obrázku žluté), tolloku 132 – svěrné pouzdro (na obrázku šedý) [71], dvou ložisek typu 61805 od SKF (na obrázku červené) [73] a gufera. Výstupní kolo bude spojeno s výstupní hřídelí přes tollok 132 30x55. Díky použití tolloku bude opět spojené bez vůle. Tollok 132 30x55 dokáže přenést kroučící moment o velikosti 670 Nm. Výstupní hřídel (na obrázku modrá) bude uložena ve dvou ložiskách typu 61805, které jsou zalisovány do převodové skříně. Tato hřídel ale také nemá pevné rozměry a je možné ji vyrábět v různých konfiguracích. Opět bude záležet pouze na přání zákazníka. Výstupní díra pro hřídel je utěsněná opět pomocí gufera.



Obr. 51) Konstrukční uzel 5

Shrnutí výsledků konstrukčního uzlu označeného 5 ve schématu (obr. 45).

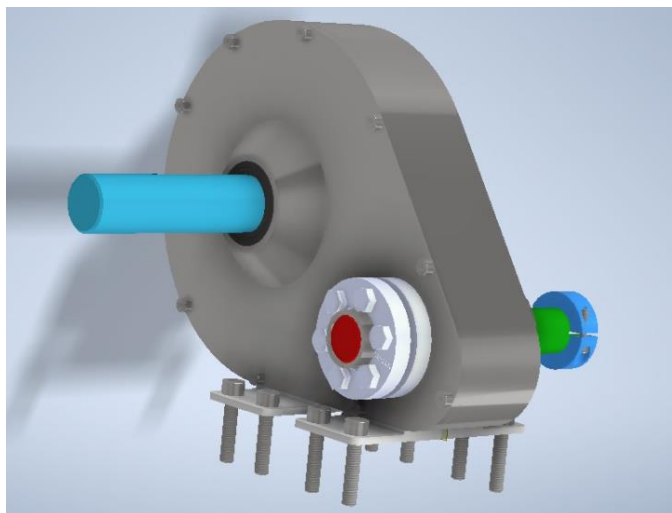
Tab 18) Výstupní ozubené kolo označené indexem 5

Výstupní kolo	Veličina
Modul	0,8 mm
Počet zubů	171 (-)
Průměr roztečné kružnice $d_5$	$\Phi$ 138,4 mm
Šířka $b_5$	30 mm
Součinitel bezpečnosti v dotyku $S_{H5}$	2,7 (-)
Součinitel bezpečnosti v ohybu $S_{F5}$	11,17 (-)
Materiál	16MnCr5
Tvrдость dle HRC	62 (-)

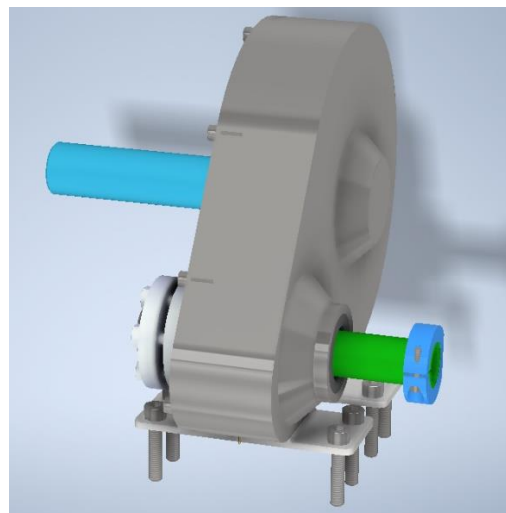
#### 4.3.6 Ostatní součásti planetového mechanismu a mazání

Nedílnou součástí planetového mechanismu je v tomto případě její skříň, která je vyrobena z šedé litiny GJL-250 technologií odlévání. Víko skříně je přišroubované 10 šrouby M4 x 12 ISO 4762 (šroub s vnitřním šestihranem). Vůle mezi pohyblivými součástmi a skříní planetové převodovky je minimálně 1 mm. Jedna z variant, jak ustavit skříň s planetovým mechanismem, je pomocí dvou podstavných nohou (viz obr. 52 a obr. 53), které se svaří koutovým svarem ke skříní převodovky. Tyto podstavné nohy se následně přišroubují k pevnému rámu stroje.

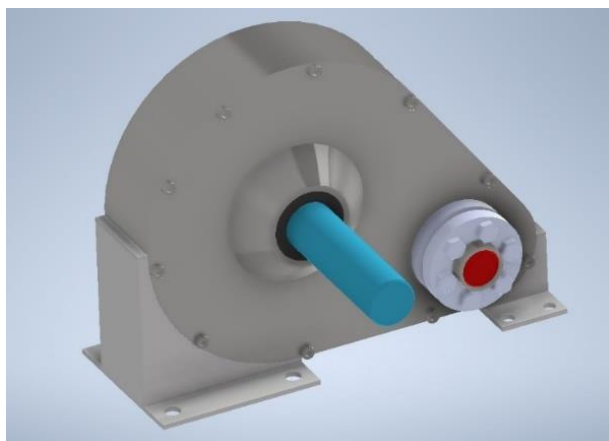
Další možná konfigurace (viz obr. 54) je navaření z boku převodové skříně dvou podstavců, které se následně připevní k rámu stroje. Budou k dostání samozřejmě i další jiné konfigurace uchycení planetové převodovky k rámu stroje. Na výstup převodovky je nutné namontovat kuličkový šroub s maticí. Jedna z možností, jak připojit tento kuličkový šroub s maticí, je pomocí bezvúlové spojky (viz obr. 55).



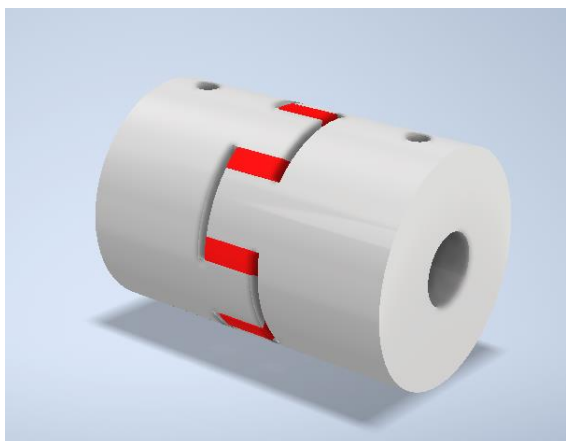
Obr. 52) Planetová převodovka pohled A



Obr. 53) Planetová převodovka pohled B



Obr. 54) Další konfigurace uchycení převodovky



Obr. 55) Bezvúlová spojka [74]

Tab 19) Kusovník planetové převodovky

POLOŽKA	KS	ČÍSLO SOUČÁSTI	POPIS	Cena (Kč/MJ)
1	1	DP-02-00-24	První převod	1 442
2	1	DP-01-05-24	Výstupní kolo 5	750
3	1	DP-01-07-24	Výstupní hřídel	120
4	1	DP-01-08-24	Skříň převodovky	2 100
5	1	DP-01-09-24	Víko skříně	1 300
6	1	DP-01-10-24	Stahovací pouzdro	25
7	2	DP-01-12-24	Noha podstavná	80
8	2	DP-01-11-24	Distanční kroužek	5 (10)
9	2	DP-01-14-24	Bronzová destička	10 (20)
10	1	TOLLOK_132_30x55	Svěrné pouzdro [75]	273,60
11	1	TOLLOK_603_24x50	Svěrné pouzdro [76]	622,25
12	1	SKF 61904_2	Ložisko valivé	319,70
13	2	SKF 61805_2	Ložisko valivé	348,50 (697)
14	1	ISO 6194/1 – 25x40x7-	Hřídelové těsnění v provedení 6 – Smontované, s prachovkou	19
15	1	ISO 6194/1 – 20x35x7-	Hřídelové těsnění v provedení 6 – Smontované, s prachovkou	19
16	1	DIN 472 – 35x1,5	Pojistné kroužky pro otvory	0,70
17	1	ISO 4762 – M3 x 16	Šroub s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem	0,46
18	8	ISO 4762 – M6 x 30	Šroub s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem	0,46 (3,68)
19	10	ISO 4762 – M4 x 12	Šroub s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem	0,46 (4,60)

Cena materiálu<sup>15</sup> na výrobu planetové převodovky bude odhadem 7 807 Kč, bez montáže a svařování. Se svařováním, montáží a mazivem bude celková cena přibližně 12 000 Kč. Normalizované komponenty byly použity s knihovny aplikace Inventor a patřičné údaje byly použity z norem [8].

#### Mazání

Mazání je velmi důležitou součástí planetové převodovky. Zajišťuje plynulý chod a snižuje opotřebení ozubených kol v převodovce. Navrhnutá převodovka bude mazána pomocí maziva Nyogel 792D. Mazivo Nyogel 792D je standardní provedení maziva vhodné pro většinu aplikací. Teplotní rozsah použití tohoto maziva je -30 °C až 125 °C. Bezpečnostní a katalogový

<sup>15</sup> Cena normalizovaných komponent (pokud není uvedeno jinak) byla použita z Mateza.cz [81].

list maziva je zahrnutý v přílohách. K dostání jsou ještě dva další typy maziva Nyogel 670F<sup>16</sup> a Nyogel 380G1<sup>17</sup>.

#### 4.3.7 Parametry planetové převodovky ve variantě S2

Planetová převodovka byla počítána se jmenovitými vstupními otáčkami 2 000 min<sup>-1</sup> a vstupním kroutícím momentem 20 Nm. Z výpočtů je ale patrné, že dokáže přenést vyšší kroutící moment (a to až 25 Nm) a také dokáže přenést vyšší otáčky (až 7 600 min<sup>-1</sup>). I při zvýšení těchto vstupních parametrů až na maximální možné hodnoty nebude bezpečnost v ohybu či v dotyku menší než 1. Zároveň otáčky 7 600 min<sup>-1</sup> dokáže ještě přenést kluzné ložiskové pouzdro. Tento limit je možné i překročit, ale nelze převodovku provozovat nad tímto limitem dlouhodobě.

Tab 20) Parametry planetové převodovky

Parametr	velikost
Celkový převodový poměr	2 (1,96)
Vstupní jmenovité otáčky	2 000 min <sup>-1</sup>
Vstupní maximální otáčky	7 600 min <sup>-1</sup>
Výstupní jmenovité otáčky (otáčky KŠM)	1 022,56 min <sup>-1</sup>
Výstupní maximální otáčky	3 885,71 min <sup>-1</sup>
Vstupní jmenovité kroutící moment	20 Nm
Vstupní maximální kroutící moment	25 Nm
Výstupní jmenovitý kroutící moment	39,12 Nm
Výstupní maximální kroutící moment	48,9 Nm

Tab 21) Zástavbové rozměry planetové převodovky

Minimální zástavbové rozměry	
Hloubka	90 mm
Šířka	220 mm
Výška	165 mm

#### 4.3.8 Bezpečnostní opatření planetové převodovky

Při provozu stroje s planetovou převodovkou je nutné řešit bezpečnost práce osob obsluhující dané zařízení. Planetová převodovka má na vstupní i výstupní hřídeli poměrně vysoké otáčky a velký kroutící moment, čímž vždy může hrozit riziko navinutí části pracovníka, oděvu či části oděvu pracovníka. Mohou také vzniknout další rizika. Cíl bezpečnostních opatření spočívá v zamezení vzniku nebezpečných situací, a tím eliminuje vznik škod na majetku, zranění, osob nebo i smrtelné úrazy. Analýza rizik je velmi komplexní záležitostí, která by přesahovala rámec

<sup>16</sup> je mazivo ideální pro potravinářský průmysl, může přijít do kontaktu s potravinami.

<sup>17</sup> Využití tohoto maziva je zejména při extrémních teplotách (-50 °C až 130 °C).

této diplomové práce, proto zde nebude řešena. Níže jsou však zmíněny konkrétní normy a prvky, kterými je vhodné se řídit. Bezpečnost strojních zařízení je vždy nutné posuzovat v kontextu platných bezpečnostních harmonizovaných norem mezi které patří především [77]:

- **ČSN EN ISO 12100** - Bezpečnost strojních zařízení – Všeobecné zásady pro konstrukci – Posouzení rizika a snižování rizika.
- **ČSN EN ISO 14119** - Bezpečnost strojních zařízení – Blokovací zařízení spojená s ochrannými kryty – Zásady pro konstrukci a volbu.
- **ČSN EN ISO 13850** - Bezpečnost strojních zařízení – Funkce nouzového zastavení – Zásady pro konstrukci.
- **ČSN EN ISO 14120** – Bezpečnost strojních zařízení – Ochranné kryty – obecné požadavky pro konstrukci a výrobu pevných a pohyblivých krytů.
- **ČSN EN ISO 16090-1** – Bezpečnost obráběcích strojů – Obráběcí centra, frézky, postupové stroje – tato norma není harmonizována, ale byla použita pro export a prodej stroje mimo EU.
- **ČSN EN 12417+A2** – Bezpečnost obráběcích a tvářecích strojů – obráběcí centra.
- **ČSN EN ISO 13857** – Bezpečnost strojních zařízení – Bezpečné vzdálenosti k zamezení dosahu do nebezpečných prostorů horními a dolními končetinami

#### 4.3.9 Porovnání s planetovou převodovkou na trhu

Pro srovnání navržené planetové převodovky a planetové převodovky dostupné na trhu byla vybrána jednostupňová planetová převodovka CP005 MF od společnosti Wittenstein Alpha. Porovnatelné parametry jsou přehledně znázorněny v následující tabulce.

Tab 22) Porovnání planetových převodovek

Parametr	Navržená planetová převodovka	Planetová převodovka CP005 MF Wittenstein Alpha
Počet převodových stupňů	1	1
Převodový poměr	2	4
Maximální kroučící moment (Nm)	25	17
Maximální vstupní otáčky ( $\text{min}^{-1}$ )	7 800 (popř.: 12 500)	9 000
Cena	12 000 Kč	18 000 Kč <sup>18</sup>

<sup>18</sup> Cena byla odhadnuta na základě bazarové nabídky velmi podobné převodovky [80].



## 5 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

Novou myšlenkou a základem této planetové převodovky je ozubené kolo s vnitřním a vnějším ozubením. Hlavní výhodou tohoto mechanismu shledávám v tom, že není nutné použít žádné další komponenty nebo unašeče pro přenos kroutícího momentu z korunového kola na další kolo. V tomto případě první převod (tedy centrální kolo, satelity a korunové kolo) funguje jako pastorek, který pohání výstupní kolo.

Převodový poměr tohoto mechanismu je přímo závislý na velikosti výstupního kola, proto tedy pokud bychom připustili větší rozměry planetové převodovky, dosáhli bychom i lepšího převodového poměru. Další možnost, jak na práci navázat a pokusit se ještě o další vylepšení a optimalizaci planetové převodovky, by bylo přidáním dalších ozubených kol, čímž by se opět zlepšil převodový stupeň celého mechanismu. Planetové převodovky mohou být i vícestupňové, bylo by tedy velmi zajímavé navázat na tuto práci právě přidáním více stupňů do navržené varianty převodovky.

Navržený mechanismus je možné použít i ve variantě s ozubeným řemenem (v této práci označena jako varianta S3). Vnitřní ozubení je klasické evolventní s přímými zuby. Na vnější straně je ozubení pro ozubený řemen. Tato varianta byla rozpracována, vypočítána a je také součástí přiložené technické dokumentace.

Výhodou této varianty je, že dokáže přenést větší vstupní kroutící moment a větší maximální otáčky než konkurenční planetová převodovka. Další velkou výhodou shledávám v tom, že navrhnoutou planetovou převodovku lze velmi dobře nakonfigurovat dle přání zákazníka. Například pozici, z jaké strany do převodovky vstupují jednotlivé hřídele, lze dle potřeby změnit. Další možnou konfigurací je samotné uchycení skříňe planetové převodovky k rámu stroje.

Planetová převodovka je velmi komplexní strojní součást a různé aspekty řešení by byly nad rámec této práce. Zde uvedu několik příkladů, které mohou být v praxi řešeny, ale v této práci již není z kapacitních a jiných důvodů prostor pro jejich řešení. Například hlučnost a rezonance navržené převodovky nejsou v této práci řešeny, protože jejich řešení by přesahovalo rámec této diplomové práce. Modelové řešení MKP je také zjednodušené, ale je dostačující pro řešení vzhledem k mezním stavům. Problematika v oblasti zubové vůle je také velmi komplikovaná záležitost a její řešení by přesahovalo rámec této diplomové práce. Tepelný management planetových převodovek je velmi komplexní a komplikovaná záležitost, která by přesahovala rámec této práce, a proto zde není řešena. Nicméně všechny problémy zmíněné výše mohou být dostatečně dobrým podkladem pro navázání na tuto práci a další rozšíření řešení a výsledků do budoucna.



## 6 ZÁVĚR

Tato diplomová práce je rozdělena do dvou hlavních částí. První část této práce je rešeršního charakteru a zabývá se základními typy náhonu CNC posuvových soustav. Dále se rešerše zabývá popisem základních pojmů v oblasti ozubení. Následuje kapitola pojednávající o výrobě a dokončování ozubených kol. Tato kapitola je rozdělena na dvě podkapitoly a to: výroba ozubených kol na konvenčních strojích a výroba ozubení na moderních CNC strojích. V závěru samotné rešerše je kapitola, která představuje planetové převodovky dostupné na trhu a jejich výrobců.

Druhá část této práce se zabývá samotným návrhem planetové převodovky. Nejpodstatnější část planetové převodovky spočívá v návrhu speciálního ozubeného kola s vnitřním a vnějším ozubením. Toto ozubené kolo funguje následujícím způsobem: uvnitř ozubení je planetový mechanismus, jehož satelity otáčejí ozubeným kolem. Vnější část ozubení je potom v záběru s výstupním kolem. Základem je dokázat způsob převodu, kde mezi korunovým kolem s vnitřním a vnějším ozubením a výstupním kolem není žádný unašeč ani žádná další komponenta, a tedy je možné tento převod energie realizovat napřímo.

Byly navrženy 3 varianty provedení a uplatnění mechanismu v praxi. První návrh (S1) planetového mechanismu byl použit ve formě pastorek s hřebenem. Tento návrh nebyl vybrán, protože z výše uvedených důvodů nevyhovoval zadání diplomové práce, ale i tento návrh by bylo možné realizovat. Druhý návrh (S2), tedy návrh v záběru s dalším ozubeným kolem napojený na kuličkový šroub s maticí, byl vybrán, vypočítán, vymodelován s patričníou výkresovou dokumentací. Tato varianta byla dle systémového přístupu rozdělena do 5 konstrukčních uzlů. Pro každý uzel byly provedeny dynamické a kinematické výpočty a byla ověřena bezpečnost vzhledem k meznímu stavu pružnosti. Planetová převodovka, jejíž součástí je ozubené kolo s vnitřním a vnějším převodem, je konkurenceschopná. Další výhody jsou, že dokáže přenést vyšší kroutící moment, je velmi dobře konfigurovatelná dle přání a potřeb zákazníka a odhadovaná cena je nižší než cena konkurenční planetové převodovky. Poslední varianta (S3) je zmíněný mechanismus s ozubeným řemenem. Tato varianta je upravena takovým způsobem, že místo vnějšího přímého evolventního ozubení, je ozubení pro řemen s lichoběžníkovými zuby. Varianta S3 je rozpracována a je také součástí příloh. Na tuto variantu by bylo možné v budoucnu navázat.

Všechny cíle práce se podařilo splnit. Chtěl bych také ale podotknout, že na problematice planetových převodovek pracují celé týmy zkušených expertů a odborníků, proto jsem si vědom, že tato práce má celou řadu nedostatků. Jako jeden z nedostatků shledávám nižší převodový poměr. Nicméně je možné na tuto problematiku navázat a pokusit se o další optimalizaci planetového převodu. Na tuto diplomovou práci je možné v budoucnu navázat například přidáním dalšího převodového stupně do planetové převodovky. A v neposlední řadě dokončit variantu S3 (varianta s ozubeným řemenem).



## 7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HARTL, Martin. Přednáška 1: Úvod do převodů. online. In: *Konstruování strojů - převody*. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování: Vysoké učení technické v Brně, 2022. Dostupné z: [https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/380809/mod\\_resource/content/2/prednaska1.pdf](https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/380809/mod_resource/content/2/prednaska1.pdf). [cit. 2023-01-21].
- [2] HARTL, Martin. Přednáška 2: Výroba a normalizace čelního ozubení. online. In: *Konstruování strojů - převody*. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování: Vysoké učení technické v Brně, 2022. Dostupné z: [https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/380814/mod\\_resource/content/4/prednaska2\\_6KT\\_2022.pdf](https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/380814/mod_resource/content/4/prednaska2_6KT_2022.pdf). [cit. 2023-01-21].
- [3] ČERNOCH, Svatopluk. Strojně technická příručka. online. In: *Digitální knihovna Kramerius*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1977. Dostupné z: <https://kramerius.k7-test.mzk.cz/mzk/view/uuid:168d8640-dce6-11e4-8565-005056827e52?page=uuid:96af3f60-f2b4-11e4-8ded-5ef3fc9ae867>. [cit. 2023-08-27].
- [4] SVOBODA, Pavel; BRANDEJS, Jan a DVOŘÁČEK, Jiří. *Základy konstruování*. Vydání šesté. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2015. ISBN 978-80-7204-921-9.
- [5] MAREK, J. et al. *Stavba a provoz CNC obráběcích strojů*. online. 1. Brno: Ústav výrobních strojů systému a robotiky: FSI, VUT v Brně, 2023. ISBN 978-80-907452-4-7. Dostupné z: <https://www.os.fme.vutbr.cz>. [cit. 2024-01-19].
- [6] *Rm1605-1000mm kuličkový šroub s maticí*. online. In: Vevor. c2009-2024. Dostupné z: [https://eur.vevor.com/linear-guide-rail-c\\_10531/rm1605-1500mm-anti-backlashed-ballscrew-bf12-bk12-stamina-cnc-axis-c7-standard-p\\_010231176274](https://eur.vevor.com/linear-guide-rail-c_10531/rm1605-1500mm-anti-backlashed-ballscrew-bf12-bk12-stamina-cnc-axis-c7-standard-p_010231176274). [cit. 2024-01-20].
- [7] HARTL, Martin. Přednáška 3: Mechanismy s ozubenými koly. online. In: *Konstruování strojů - převody*. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování: Vysoké učení technické v Brně, 2022. Dostupné z: [https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/380817/mod\\_resource/content/2/prednaska3\\_6KT\\_2022.pdf](https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/380817/mod_resource/content/2/prednaska3_6KT_2022.pdf). [cit. 2023-01-21].
- [8] LEINVEBER, Jiří a VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky: učebnice pro školy technického zaměření*. Sedmé vydání. Úvaly: Albra, 2021. ISBN 80-736-1124-4.
- [9] Ozubené kolo čelní M 2.5 bez náboje 80 zubů. online. In: *Mateza.cz*. Dostupné z: <https://www.mateza.cz/e-shop/ozubene-kolo-celni-m-2-5-bez-naboje-80-zubu>. [cit. 2023-09-28].
- [10] Modelcraft Vnitřní ozubené kolo Počet zubů: 60, 10 Převodový poměr. online. In: *Conrad Electronic*. Dostupné z: <https://www.conrad.cz/cs/p/modelcraft-vnitri>

- ozubene-kolo-pocet-zubu-60-10-prevodovy-pomer-6-1-224506.html. [cit. 2023-09-28].
- [11] ULFAH, . Stavba a provoz strojů. online. In: *SlideServe*. Dostupné z: <https://www.slideserve.com/ulfah/stavba-a-provoz-stroj>. [cit. 2023-09-28].
- [12] HARTL, Martin. Přednáška 6: Kuželová ozubená soukolí. online. In: *Konstruování strojů - převody*. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování: Vysoké učení technické v Brně, 2022. Dostupné z: [https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/380826/mod\\_resource/content/3/prednaska6\\_6KT\\_2022.pdf](https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/380826/mod_resource/content/3/prednaska6_6KT_2022.pdf). [cit. 2023-01-21].
- [13] HARTL, Martin. Přednáška 7: ŠNEKOVÁ SOUKOLÍ. online. In: *Konstruování strojů - převody*. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování: Vysoké učení technické v Brně, 2022. Dostupné z: [https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/380828/mod\\_resource/content/2/prednaska7\\_6KT\\_2022.pdf](https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/380828/mod_resource/content/2/prednaska7_6KT_2022.pdf). [cit. 2023-01-21].
- [14] Reely ocelové kuželové kolo Typ modulu: 1.0 Počet zubů. online. In: *Conrad Electronic*. Dostupné z: <https://www.conrad.cz/cs/p/reely-ocelove-kuzelove-kolo-typ-modulu-1-0-pocet-zubu-15-45-1-par-237267.html>. [cit. 2023-09-28].
- [15] ŠAFKA, Jan. *MOŽNOSTI BEZKONSTAKTNÍCH SNÍMACÍCH SYSTÉMU PŘI KONTROLE OZUBENÍ*. Diplomová práce, vedoucí prof. Ing. Jiří Marek, Dr. PRAHA: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2023.
- [16] *Odlévání ozubených kol*. online. In: SST Machinery Co., Ltd. 2021. Dostupné z: <https://cz.sstmachinery.com/info/gear-casting-63210276.html>. [cit. 2023-12-20].
- [17] DVOŘÁK, Roman. Moderní přístupy k výrobě ozubení. online. In: *MM průmyslové spektrum*. c2001-2024. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-pristupy-k-vyrobe-ozubeni>. [cit. 2024-01-31].
- [18] WIKIPEDIE, . Výroba ozubených kol. online. In: *Wikipedie: Otevřená encyklopedie*. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/V%C3%BDroba\\_ozuben%C3%BDch\\_kol](https://cs.wikipedia.org/wiki/V%C3%BDroba_ozuben%C3%BDch_kol). [cit. 2023-10-02].
- [19] STŘEDNÍ PRŮMYSLOVÁ ŠKOLA, OSTRAVA - VÍTKOVICE, PŘÍSPĚVKOVÁ ORGANIZACE. Hoblování a Obrázení. online. In: STŘEDNÍ PRŮMYSLOVÁ ŠKOLA, OSTRAVA - VÍTKOVICE, PŘÍSPĚVKOVÁ ORGANIZACE. *Zengorvka*. 2020. Dostupné z: [https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/STT2-13\\_Hoblovani\\_a\\_Protahovani2\\_RAJ.pdf](https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/STT2-13_Hoblovani_a_Protahovani2_RAJ.pdf). [cit. 2023-12-20].
- [20] Odvalovačka, odvalovací frézka, výroba ozubených kol odvalováním. online. In: . Dostupné z: <http://www.jova1.cz/dilna/odvalovacka/odvalovacka.html>. [cit. 2023-10-03].
- [21] STŘEDNÍ PRŮMYSLOVÁ ŠKOLA, OSTRAVA - VÍTKOVICE, PŘÍSPĚVKOVÁ ORGANIZACE. Protahování a protlačování. online. In: STŘEDNÍ PRŮMYSLOVÁ ŠKOLA, OSTRAVA - VÍTKOVICE, PŘÍSPĚVKOVÁ ORGANIZACE. *Zengorvka*. 2020. Dostupné z: <https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/STT2-Protahovani.pdf>. [cit. 2023-12-20].

- [22] ŠINDELÁŘ, Martin. *Výroba ozubených kol*. online. In: SlidePlayer. 2024. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/17437541/>. [cit. 2024-01-11].
- [23] *Ševingování*. online. In: ELUC. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1396>. [cit. 2024-01-11].
- [24] NIKL, Michal. *Moderní metody dokončování ozubení*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2009.
- [25] Lapování. online. In: ELUC. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1385>. [cit. 2024-01-11].
- [26] *TOS – OFA32 CNC*. online. In: Slovácké strojírny a.s - TOS ČELÁKOVICE. c2023-2024. Dostupné z: <https://sub.cz/katalog-sub/tos/ozubeni/tos-ofa32-cnc/>. [cit. 2024-01-31].
- [27] *TOS – OFA75 CNC*. online. In: Slovácké strojírny a.s - TOS ČELÁKOVICE. c2023-2024. Dostupné z: <https://sub.cz/katalog-sub/tos/ozubeni/tos-ofa75-cnc/>. [cit. 2024-01-31].
- [28] *TOS – OFA100 CNC*. online. In: Slovácké strojírny a.s - TOS ČELÁKOVICE. c2023-2024. Dostupné z: <https://sub.cz/katalog-sub/tos/ozubeni/tos-ofa100-cnc/>. [cit. 2024-01-31].
- [29] *TOS – OHA50 CNC*. online. In: Slovácké strojírny a.s - TOS ČELÁKOVICE. c2023-2024. Dostupné z: <https://sub.cz/katalog-sub/tos/ozubeni/tos-oha-50-cnc/>. [cit. 2024-01-31].
- [30] MISAN. *Okuma Multus U3000 (1SW-1500) - Okuma - Katalog - Misan*. online. In: MISAN. Misan - Mutus. c2002-2024. Dostupné z: <https://www.misan.cz/okuma/katalog-detail/multus-u3000-1sw-1500-okuma-multus-u3000-1sw-1500/>. [cit. 2024-02-01].
- [31] *Misan: CNC obráběcí stroje Okuma, Brother, Okamoto, přístroje Concept Laser, Arcam - Misan*. online. In: Misan. c2002-2024. Dostupné z: <https://www.misan.cz/>. [cit. 2024-02-01].
- [32] *Genesis 160HCD*. online. In: Gleason Corporation. 2024. Dostupné z: <https://www.gleason.com/en/products/machines/cylindrical/hobbing-up-to-300-mm/genesis-160hcd-hobbing-machine-with-integrated-chamfer-hobbing-fast-precise-and-efficient>. [cit. 2024-02-02].
- [33] *260HMS*. online. In: Gleason Corporation. 2024. Dostupné z: <https://www.gleason.com/en/products/machines/cylindrical/gear-honing/260hms-the-versatile-single-spindle-honing-solution-for-gears-and-shafts>. [cit. 2024-02-02].
- [34] *Overview-brochure*. online. In: Gleason Corporation. 2024. Dostupné z: <https://www.gleason.com/en/products/machines/bevel/overview/overview/brochures/brochure-cylindrical-gear-manufacturing-solutions>. [cit. 2024-02-02].
- [35] *Shaving tools - Gleason*. online. In: Gleason Corporation. 2024. Dostupné z: <https://www.gleason.com/en/products/tools/cylindrical/shaving/shaving-tools>. [cit. 2024-02-02].

- [36] *Metrologický systém Gleason 300GMS nano*. online. In: Gleason Corporation. 2024. Dostupné z: <https://www.gleason.com/en/products/metrology/metrology-systems/analytical-inspection/300gms-nano-inspection-at-submicron-level>. [cit. 2024-02-02].
- [37] WIKIPEDIE, Příspěvatelé. Převodovka. online. In: *Wikipedie: Otevřená encyklopedie*. 2022. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%99evodovka>. [cit. 2024-02-06].
- [38] STŘEDNÍ PRŮMYSLOVÁ ŠKOLA STROJNICKÁ OLOMOUC. Převodovky. online. In: STŘEDNÍ PRŮMYSLOVÁ ŠKOLA STROJNICKÁ OLOMOUC. *SPŠSOL*. 2023. Dostupné z: <https://www.spssol.cz/rsimages/DIGI1/html/cad/P%C5%99evodovky/Modul.html>. [cit. 2023-12-20].
- [39] VEVERKA, Ivo. *Deskripce planetových převodovek pro pohony robotů*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009.
- [40] *AD řada*. online. In: APEX DYNAMICS CZECH - Přímé planetové převodovky. Dostupné z: <https://www.apexdynaczech.cz/produkty/prima-planetova-prevodovka-ad/>. [cit. 2024-01-24].
- [41] *APEX DYNAMICS - produkty*. online. In: APEX DYNAMICS CZECH - Planetové převodovky. Dostupné z: <https://www.apexdynaczech.cz/produkty/>. [cit. 2024-01-24].
- [42] *APEX DYNAMICS CZECH - Planetové převodovky*. online. [cit. 2023-11-05].
- [43] *PD řada*. online. In: APEX DYNAMICS CZECH - Přímé planetové převodovky. Dostupné z: <https://www.apexdynaczech.cz/produkty/prima-planetova-prevodovka-pd/>. [cit. 2024-01-24].
- [44] *PDR řada*. online. In: *APEX DYNAMICS CZECH - Úhlové planetové převodovky*. Dostupné z: <https://www.apexdynaczech.cz/produkty/uhlova-planetova-prevodovka-pdr/>. [cit. 2024-01-24].
- [45] *AH řada*. online. In: APEX DYNAMICS CZECH - Přímé planetové převodovky. Dostupné z: <https://www.apexdynaczech.cz/produkty/prima-planetova-prevodovka-ah/>. [cit. 2024-01-24].
- [46] *AHK řada*. online. In: *APEX DYNAMICS CZECH - Úhlové planetové převodovky*. Dostupné z: <https://www.apexdynaczech.cz/produkty/uhlova-planetova-prevodovka-ahk/>. [cit. 2024-01-24].
- [47] *Pastorky s přímým ozubením - APEX*. online. In: APEX DYNAMICS CZECH - Hřebeny a pastorky, mazací systémy. Dostupné z: <https://www.apexdynaczech.cz/produkt/pastorky-prime-ozubeni/>. [cit. 2024-01-24].
- [48] *Pastorky se šikmým ozubením - APEX*. online. In: APEX DYNAMICS CZECH - Hřebeny a pastorky, mazací systémy. Dostupné z: <https://www.apexdynaczech.cz/produkt/pastorky-sikme-ozubeni/>. [cit. 2024-01-24].
- [49] *Pastorek s přímým ozubením - série A - zubová spojka*. online. In: APEX DYNAMICS CZECH - Pastorky s přímým ozubením. Dostupné z:



- <https://www.apexdynaczech.cz/produkty/pastorky-prime-ozubeni-zubova-spojka/>. [cit. 2024-01-24].
- [50] *Pastorek s přímým ozubením - série B - navařená příruba*. online. In: APEX DYNAMICS CZECH - Pastorky s přímým ozubením. Dostupné z: <https://www.apexdynaczech.cz/produkty/pastorky-primym-ozubenim-navarena-priruba/>. [cit. 2024-01-24].
- [51] *Pastorek s přímým ozubením - série E - s drážkou pro pero*. online. In: APEX DYNAMICS CZECH - Pastorky s přímým ozubením. Dostupné z: <https://www.apexdynaczech.cz/produkty/pastorky-primym-ozubenim-s-drazkou-pro-pero/>. [cit. 2024-01-24].
- [52] *Pastorek s hřídelí s drážkou pro pero, s nábojem - Série G*. online. In: APEX DYNAMICS CZECH - Pastorky s přímým ozubením. Dostupné z: <https://www.apexdynaczech.cz/produkty/typ-spojzeni-pastorku-hridel-drazkou-pero-dute-hridele/>. [cit. 2024-01-24].
- [53] *Pastorek s hladkou hřídelí - Série H*. online. In: APEX DYNAMICS CZECH - Pastorky s přímým ozubením. Dostupné z: <https://www.apexdynaczech.cz/produkty/typ-spojzeni-pastorku-plna-hridel-dute-hridele-prevodovek/>. [cit. 2024-01-24].
- [54] *Pastorek s šikmým ozubením - série A - zubová spojka*. online. In: APEX DYNAMICS CZECH - Pastorky s šikmým ozubením. Dostupné z: <https://www.apexdynaczech.cz/produkty/pastorky-sikme-ozubeni-zubova-spojka/>. [cit. 2024-01-24].
- [55] *Pastorek s šikmým ozubením - série B - navařená příruba*. online. In: APEX DYNAMICS CZECH - Pastorky s šikmým ozubením. Dostupné z: <https://www.apexdynaczech.cz/produkty/pastorky-sikmym-ozubenim-navarena-priruba/>. [cit. 2024-01-24].
- [56] *Pastorek s šikmým ozubením - série E/F - s drážkou pro pero*. online. In: APEX DYNAMICS CZECH - Pastorky s šikmým ozubením. Dostupné z: <https://www.apexdynaczech.cz/produkty/pastorky-sikmym-ozubenim-s-drazkou-pro-pero/>. [cit. 2024-01-24].
- [57] *Pastorek s šikmým ozubením - série C - standardní pastorek*. online. In: APEX DYNAMICS CZECH - Pastorky s šikmým ozubením. Dostupné z: <https://www.apexdynaczech.cz/produkty/pastorky-sikmym-ozubenim-standardni-pastorek/>. [cit. 2024-01-24].
- [58] *Pastorek s šikmým ozubením - série D - vnitřní drážkování DIN5480*. online. In: APEX DYNAMICS CZECH - Pastorky s šikmým ozubením. Dostupné z: <https://www.apexdynaczech.cz/produkty/pastorky-sikmym-ozubenim-s-vnitrim-drazkovanim/>. [cit. 2024-01-24].
- [59] *Hřebeny s přímým ozubením*. online. In: APEX DYNAMICS CZECH - Hřebeny a pastorky, mazací systémy. Dostupné z: <https://www.apexdynaczech.cz/produkty/hrebeny-prime-ozubeni/>. [cit. 2024-01-24].

- [60] *Hřebeny se šikmým ozubením*. online. In: APEX DYNAMICS CZECH - Hřebeny a pastorky, mazací systémy. Dostupné z: <https://www.apexdynaczech.cz/produkty/hrebeny-sikme-ozubeni/>. [cit. 2024-01-24].
- [61] *WITTENSTEIN Česká republika*. online. In: WITTENSTEIN. 2024. Dostupné z: <https://www.wittenstein.cz/>. [cit. 2024-01-28].
- [62] *Alpha Linear Systems*. online. In: WITTENSTEIN. 2024. Dostupné z: <https://www.wittenstein.cz/fileadmin/06-Downloads/WITTENSTEIN-alpha/Kataloge/Kataloge-Flyer-en/alpha-linear-systems-en.pdf>. [cit. 2024-01-28].
- [63] KONSTRUOVÁNÍ, Ústav. Cvičení 1: Startér. online. In: *Konstruování strojů - převody*. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování: Vysoké učení technické v Brně, 2022. Dostupné z: [https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/387285/mod\\_resource/content/2/6KT\\_1.cviceni\\_ELEARNING.pdf](https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/387285/mod_resource/content/2/6KT_1.cviceni_ELEARNING.pdf). [cit. 2023-01-21].
- [64] KONSTRUOVÁNÍ, Ústav. Cvičení 2: Startér. online. In: *Konstruování strojů - převody*. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování: Vysoké učení technické v Brně, 2022. Dostupné z: [https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/397464/mod\\_resource/content/4/6KT\\_2.cviceni\\_PLANETOVKA.pdf](https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/397464/mod_resource/content/4/6KT_2.cviceni_PLANETOVKA.pdf). [cit. 2023-01-21].
- [65] SHIGLEY, Joseph Edward; MISCHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard G. (Richard Gordon); HARTL, Martin a VLK, Miloš. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. V Brně: VUTIUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [66] KONSTRUOVÁNÍ, Ústav. Cvičení 3: Startér. online. In: *Konstruování strojů - převody*. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování: Vysoké učení technické v Brně, 2022. Dostupné z: [https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/402089/mod\\_resource/content/1/Cvi%C4%8Den%C3%AD%203%20-%20Start%C3%A9r.pdf](https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/402089/mod_resource/content/1/Cvi%C4%8Den%C3%AD%203%20-%20Start%C3%A9r.pdf). [cit. 2023-01-21].
- [67] KONSTRUOVÁNÍ, Ústav. Cvičení 4: Startér. online. In: *Konstruování strojů - převody*. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování: Vysoké učení technické v Brně, 2022. Dostupné z: [https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/404295/mod\\_resource/content/2/6KT\\_4.pdf](https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/404295/mod_resource/content/2/6KT_4.pdf). [cit. 2023-01-21].
- [68] KONSTRUOVÁNÍ, Ústav. Cvičení 5: Startér. online. In: *Konstruování strojů - převody*. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování: Vysoké učení technické v Brně, 2022. Dostupné z: [https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/406249/mod\\_resource/content/3/6KT\\_5.cviceni\\_ver2.pdf](https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/406249/mod_resource/content/3/6KT_5.cviceni_ver2.pdf). [cit. 2023-01-21].
- [69] KONSTRUOVÁNÍ, Ústav. Cvičení 6: Startér. online. In: *Konstruování strojů - převody*. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování: Vysoké učení technické v Brně, 2022. Dostupné z: [https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/408054/mod\\_resource/content/2/6KT\\_6.cviceni\\_2022.pdf](https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/408054/mod_resource/content/2/6KT_6.cviceni_2022.pdf). [cit. 2023-01-21].

- [70] SKF. *PCM 050710 E Kluzné pouzdro s kompozitem PTFE*. online. In: SKF. 2024. Dostupné z: <https://www.skf.com/cz/productinfo/productid-PCM%20050710%20E>. [cit. 2024-05-10].
- [71] REXNORD. Locking devices catalog. online. In: REXNORD. *Locking Devices*. c2012-2023. Dostupné z: [https://www.rexnord.com/contentitems/techlibrary/documents/pt2-001m\\_a4\\_catalog](https://www.rexnord.com/contentitems/techlibrary/documents/pt2-001m_a4_catalog). [cit. 2024-05-10].
- [72] SKF S.R.O. 61904 - Deep groove ball bearing. online. In: SKF S.R.O. *SKF*. 2024. Dostupné z: <https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-61904>. [cit. 2024-05-10].
- [73] SKF S.R.O. 61805 - Deep groove ball bearing. online. In: SKF S.R.O. *SKF*. 2024. Dostupné z: <https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-61805>. [cit. 2024-05-10].
- [74] TRACEPARTS, . *Bezvůlová spojka nevrтанá, nebo s vrtáním H7 bez drážky pro pero a se 2 stavěcími šrouby*. online. In: TraceParts. 2024. Dostupné z: [https://www.traceparts.com/cs/product/technische-antriebs-elemente-gmbh-germany-bezvulova-spojka-nevrtana-nebo-s-vrtanim-h7-bez-drazky-pro-pero-a-se-2-stavecimi-srouby?CatalogPath=TEA\\_GER%3ATEA.40.130&Product=80-13122007-931851](https://www.traceparts.com/cs/product/technische-antriebs-elemente-gmbh-germany-bezvulova-spojka-nevrtana-nebo-s-vrtanim-h7-bez-drazky-pro-pero-a-se-2-stavecimi-srouby?CatalogPath=TEA_GER%3ATEA.40.130&Product=80-13122007-931851). [cit. 2024-05-11].
- [75] TRACEPARTS, . *Locking assembly - self-centering TLK 132*. online. In: TraceParts. 2024. Dostupné z: <https://www.traceparts.com/cs/product/rexnord-tollok-srl-locking-assembly-self-centering-d-30-mm-d-55-mm?Product=10-13102016-093228&PartNumber=TLK%20132%2030x55>. [cit. 2024-05-11].
- [76] TRACEPARTS, . *Shrink discs - standard version TLK 603*. online. In: TraceParts. 2024. Dostupné z: <https://www.traceparts.com/en/product/rexnord-tollok-srl-shrink-discs-standard-version-d-24-mm-d-50-mm?Product=10-27072016-071659&PartNumber=TLK%20603%2024x50>. [cit. 2024-05-11].
- [77] HLADÍK, Ondřej. *Virtuální zprovoznění robotického svařovacího pracoviště*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2023.
- [78] Faseta. online. In: *Wikipedie: Otevřená encyklopedie*. 2023. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Faseta>. [cit. 2023-12-20].
- [79] Diferenciál (mechanika). online. In: *Wikipedie: Otevřená encyklopedie*. 2023. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Diferenci%C3%A1l\\_\(mechanika\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Diferenci%C3%A1l_(mechanika)). [cit. 2023-12-20].
- [80] *CP 080-M01-10-111-000 Wittenstein*. online. In: ArtisanTG™. 2024. Dostupné z: <https://www.artisanTG.com/PLC/97916-1/Wittenstein-Alpha-CP-080-M01-10-111-000-CP-Planetary-Gearbox>. [cit. 2024-05-13].
- [81] *Mateza.cz*. online. Dostupné z: <https://www.mateza.cz/>. [cit. 2023-09-28].
- [82] Precizní planetová převodovka – náročný a dokonalý produkt. online. In: *Náročný a dokonalý produkt - Portál pro strojní konstruktéry*. c2013-2017. Dostupné z: <https://e->

[konstrukter.cz/novinka/precizni-planetova-prevodovka-narocny-a-dokonaly-produkt](https://konstrukter.cz/novinka/precizni-planetova-prevodovka-narocny-a-dokonaly-produkt).  
[cit. 2024-05-18].

## 8 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

### 8.1 Seznam tabulek

TAB 1) PASTORKY S PŘÍMÝM OZUBENÍM APEX DYNAMICS [49], [50], [51], [52], [53].	37
TAB 2) PASTORKY S ŠIKMÝM OZUBENÍM APEX DYNAMICS [54], [55], [51], [56], [57], [58].	37
TAB 3) ZÁKLADNÍ ŘADA LINEÁRNÍCH SYSTÉMŮ VLS (OBR. 37) [62] .....	40
TAB 4) POKROČILÁ ŘADA LINEÁRNÍCH SYSTÉMŮ ALS [62] .....	41
TAB 5) POKROČILÁ ŘADA LINEÁRNÍCH SYSTÉMŮ ALS S MOTORY TP+ [62]	41
TAB 6) POKROČILÁ ŘADA LINEÁRNÍCH SYSTÉMŮ ALS S MOTORY TP+ [62]	41
TAB 7) PRÉMIOVÁ ŘADA LINEÁRNÍCH SYSTÉMŮ PLS [62] .....	42
TAB 8) PRÉMIOVÁ ŘADA LINEÁRNÍCH SYSTÉMŮ PLS [62] .....	42
TAB 9) PRÉMIOVÁ ŘADA LINEÁRNÍCH SYSTÉMŮ PLS [62] .....	42
TAB 10) SYSTÉM PODSTATNÝCH VELIČIN .....	45
TAB 11) KUSOVNÍK PRVNÍHO PŘEVODU .....	55
TAB 12) VETKNUTÉ CENTRÁLNÍ KOLO .....	56
TAB 13) VETKNUTÁ HŘÍDEL S OZUBENÝM KOLEM .....	57
TAB 14) SATELITY (2) .....	58
TAB 15) ULOŽENÍ SATELITU (OBR. 51) A UNAŠEČE .....	58
TAB 16) VNITŘNÍ OZUBENÍ (3) KORUNOVÉHO KOLA .....	59
TAB 17) VNĚJŠÍ OZUBENÍ (4) KORUNOVÉHO KOLA .....	59
TAB 18) VÝSTUPNÍ OZUBENÉ KOLO OZNAČENÉ INDEXEM 5 .....	60
TAB 19) KUSOVNÍK PLANETOVÉ PŘEVODOVKY .....	62
TAB 20) PARAMETRY PLANETOVÉ PŘEVODOVKY .....	63
TAB 21) ZÁSTAVBOVÉ ROZMĚRY PLANETOVÉ PŘEVODOVKY .....	63
TAB 22) POROVNÁNÍ PLANETOVÝCH PŘEVODOVEK .....	64

### 8.2 Seznam obrázků

OBR. 1) ZPŮSOB NAPOJENÍ AC SERVOPOHONU NA KULIČKOVÝ ŠROUB [5], [KSK PRECISE MOTION], [GERVAH] .....	20
OBR. 2) KULIČKOVÝ ŠROUB S MATICÍ [5], [KSK PRECISE MOTION] .....	20
OBR. 3) KŠM RM1605-1000MM [6] .....	20

<b>OBR. 4) NÁHON POMOCÍ LINEÁRNÍHO MOTORU [5], [SIEMENS] .....</b>	<b>21</b>
<b>OBR. 5) PLANETOVÁ PŘEVODOVKA S PASTORKEM A HŘEBENEM.....</b>	<b>22</b>
<b>OBR. 6) POHON PASTORKEM A HŘEBENEM S ELEKTRICKÝM VYMEZENÍM VŮLE – MASTER SLAVE [5].....</b>	<b>22</b>
<b>OBR. 7) VNĚJŠÍ ČELNÍ OZUBENÉ KOLO S PŘÍMÝMI ZUBY (M 2.5 80 ZUBŮ) [9] 24</b>	
<b>OBR. 8) VNITŘNÍ OZUBENÉ ČELNÍ KOLO [10].....</b>	<b>24</b>
<b>OBR. 9) ČELNÍ OZUBENÉ SOUKOLÍ SE ŠIKMÝMI ZUBY [11] .....</b>	<b>24</b>
<b>OBR. 10) KUŽELOVÉ OZUBENÉ SOUKOLÍ S PŘÍMÝMI ZUBY [14].....</b>	<b>25</b>
<b>OBR. 11) ŠNEK S OZUBENÝM KOLEM [13].....</b>	<b>25</b>
<b>OBR. 12) VÁLCOVÁNÍ OZUBENÍ [2].....</b>	<b>26</b>
<b>OBR. 13) ODVALOVACÍ FRÉZA [20] .....</b>	<b>27</b>
<b>OBR. 14) OBRÁŽECÍ NOŽE [19] .....</b>	<b>27</b>
<b>OBR. 15) POSTUPNÉ PROTAHOVÁNÍ [22] .....</b>	<b>27</b>
<b>OBR. 16) PROTAHOVACÍ TRNY [21] .....</b>	<b>27</b>
<b>OBR. 17) ŠEVINGOVACÍ KOLO [22] .....</b>	<b>28</b>
<b>OBR. 18) HONOVACÍ KOLO [24] .....</b>	<b>28</b>
<b>OBR. 19) SCHÉMA LAPOVACÍHO PROCESU [24] .....</b>	<b>29</b>
<b>OBR. 20) KOTOUČ S PROFILEM VE TVARU ZUBOVÉ MEZERY [24] .....</b>	<b>30</b>
<b>OBR. 21) SVISLÁ ODVALOVACÍ FRÉZKA NA OZUBENÍ OFA 32 CNC 6 [26]31</b>	
<b>OBR. 22) OKUMA MULTUS U3000 (1SW-1500) [30].....</b>	<b>31</b>
<b>OBR. 23) VERTIKÁLNÍ ODVALOVACÍ FRÉZKA ŘADY GENESIS 160 HCD [32] 32</b>	
<b>OBR. 24) UNIVERZÁLNÍ JEDNO-VŘETENOVÝ HONOVACÍ STROJ 260HMS [33] 32</b>	
<b>OBR. 25) ŠEVINGOVACÍ KOLA FIRMY GLEASON PRO VNĚJŠÍ A VNITŘNÍ OZUBENÍ [35].....</b>	<b>32</b>
<b>OBR. 26) METROLOGICKÝ SYSTÉM GLEASON 300GMS NANO [36] .....</b>	<b>32</b>
<b>OBR. 27) PLANETOVÝ MECHANISMUS [38].....</b>	<b>33</b>
<b>OBR. 28) JEDNODUCHÝ PLANETOVÝ PŘEVOD [39] .....</b>	<b>34</b>
<b>OBR. 29) PŘÍMÁ PLANETOVÁ PŘEVODOVKA ŘADY AD [40].....</b>	<b>35</b>
<b>OBR. 30) PŘÍMÁ PLANETOVÁ PŘEVODOVKA ŘADY AH [45].....</b>	<b>36</b>
<b>OBR. 31) ÚHLOVÁ PLANETOVÉ PŘEVODOVKA ŘADY AHK [46].....</b>	<b>36</b>
<b>OBR. 32) PASTOREK S ŠIKMÝM OZUBENÍM – SÉRIE A – ZUBOVÁ SPOJKA [54] 38</b>	
<b>OBR. 33) PASTOREK S HŘÍDELÍ S DRÁŽKOU PRO PERO, S NÁBOJEM – SÉRIE G [52].....</b>	<b>38</b>

OBR. 34) OZUBENÉ HŘEBENY APEX DYNAMICS [59] .....	39
OBR. 35) LINEÁRNÍ SYSTÉMY WITTENSTEIN ALPHA [62] .....	39
OBR. 36) RMS – PASTOREK S PŘÍMÝM DRÁŽKOVÁNÍM (DLE DIN 5480) [62]. 40	
OBR. 37) PLANETOVÁ PŘEVODOVKA ŘADY NPR PRO SYSTÉM VLS WITTENSTEIN ALPHA [62] .....	40
OBR. 38) ROTAČNÍ SYSTÉM SPOLEČNOSTI WITTENSTEIN ALPHA [62] ...	43
OBR. 39) VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY .....	43
OBR. 40) SYSTÉMOVÝ PŘÍSTUP PRO NAVRŽENOU PLANETOVOU PŘEVODOVKU .....	44
OBR. 41) OZUBENÉ KOLO S VNĚJŠÍM A VNITŘNÍM OZUBENÍM .....	46
OBR. 42) OZUBENÝ HŘEBEN A PLANETOVÁ PŘEVODOVKA V JEDNOM (VARIANTA S1) .....	46
OBR. 43) DVOJITÉ OZUBENÉ KOLO S PŘEVODEM (VARIANTA S2) .....	47
OBR. 44) PŘEVOD S OZUBENÝM ŘEMENEM (VARIANTA S3) .....	47
OBR. 45) ROZDĚLENÍ KONSTRUKČNÍCH UZLŮ POTŘEBNÝCH PRO VÝPOČET .....	49
OBR. 46) PRVNÍ PŘEVOD .....	55
OBR. 47) PRVNÍ KONSTRUKČNÍ UZEL .....	56
OBR. 48) ZJEDNODUŠENÝ MODEL CENTRÁLNÍHO KOLA .....	57
OBR. 49) MKP (MAX 357,9 MPA) .....	57
OBR. 50) SATELIT .....	58
OBR. 51) KONSTRUKČNÍ UZEL 5 .....	60
OBR. 52) PLANETOVÁ PŘEVODOVKA POHLED A .....	61
OBR. 53) PLANETOVÁ PŘEVODOVKA POHLED B .....	61
OBR. 54) DALŠÍ KONFIGURACE UCHYCENÍ PŘEVODOVKY .....	61
OBR. 55) BEZVŮLOVÁ SPOJKA [74] .....	61

### 8.3 Seznam symbolů a zkratek

Označení	Název veličiny	Jednotka
$a_{12}$	Osová vzdálenost	[mm]
$a_{45}$	Osová vzdálenost mezi výstupním kolem a korunovým kolem	[mm]
$A_F$	Koeficient tvrdosti v ohybu dle tabulky	[-]
$A_H$	Koeficient tvrdosti v dotyku dle tabulky	[-]
$a_p$	Osová vzdálenost řemenic	[mm]
$a_{w12}$	Valivá osová vzdálenost	[mm]

$a_{w45}$	Valivá osová vzdálenost mezi výstupním kolem a korunovým kolem	[mm]
$b_1$	Šířka centrálního kola	[mm]
$b_2$	Šířka satelitu	[mm]
$b_{2kl}$	Šířka kluzného ložiskového pouzdra	[mm]
$b_3$	Šířka korunového kola	[mm]
$b_4$	Šířka korunového kola	[mm]
$b_5$	Šířka korunového výstupního kola	[mm]
$B_F$	Koeficient tvrdosti v ohybu dle tabulky	[-]
$B_H$	Koeficient tvrdosti v dotyku dle tabulky	[-]
$c$	Hlavová vůle	[mm]
$c_5$	Hlavová vůle	[mm]
$c_\gamma$	Střední měrná tuhost zubů	$\left[ \frac{N}{mm \mu m} \right]$
$d_1$	Průměr roztečné kružnice centrálního kola	[mm]
$d_2$	Průměr roztečné kružnice satelitu	[mm]
$d_3$	Průměr roztečné kružnice korunového kola	[mm]
$d_4$	Průměr roztečné kružnice korunového kola na vnější straně	[mm]
$d_5$	Průměr roztečné kružnice výstupního kola	[mm]
$d_{a1}$	Průměr hlavové kružnice centrálního kola	[mm]
$d_{a2}$	Průměr hlavové kružnice satelitu	[mm]
$d_{a3}$	Průměr hlavové kružnice korunového kola	[mm]
$d_{a4}$	Průměr hlavové kružnice korunového kola na vnější straně	[mm]
$d_{a5}$	Průměr hlavové kružnice výstupního kola	[mm]
$d_{b1}$	Průměr základní kružnice centrálního kola	[mm]
$d_{b2}$	Průměr základní kružnice satelitu	[mm]
$d_{b3}$	Průměr základní kružnice korunového kola	[mm]
$d_{b4}$	Průměr základní kružnice korunového kola na vnější straně	[mm]
$d_{b5}$	Průměr základní kružnice výstupního kola	[mm]
$d_{f1}$	Průměr patní kružnice centrálního kola	[mm]
$d_{f2}$	Průměr patní kružnice satelitu	[mm]
$d_{f3}$	Průměr patní kružnice korunového kola	[mm]
$d_{f4}$	Průměr patní kružnice korunového kola na vnější straně	[mm]
$d_{f5}$	Průměr patní kružnice výstupního kola	[mm]
$d_w$	Průměr malé řemenice s vnitřním ozubením	[mm]
$D_w$	Průměr velké řemenice	[mm]
$d_{w1}$	Průměr valivé kružnice centrálního kola	[mm]
$d_{w2}$	Průměr valivé kružnice satelitu	[mm]
$d_{w3}$	Průměr valivé kružnice korunového kola	[mm]



$d_{w4}$	Průměr valivé kružnice korunového kola na vnější straně	[mm]
$d_{w5}$	Průměr valivé kružnice výstupního kola	[mm]
$E$	Modul pružnosti jednotlivých kol	[GPa]
$e_s$	Šířka zubové mezery	[mm]
$e_{s5}$	Šířka zubové mezery	[mm]
$F_{KSM}$	Výstupní síla kuličkového šroubu s maticí	[N]
$F_n$	Zatížení od normálové síly	[N]
$F_r$	Zatížení od radiální síly	[N]
$F_t$	Zatížení od obvodové síly	[N]
$F_{tH}$	Směrodatná obvodová síla v čelní rovině	[N]
$F_{tU}$	Radiální síla v uložení satelitu	[N]
$h$	Výška zubu	[mm]
$H$	Tvrдость dle Vickerse	[HV]
$HRC$	Tvrдость dle Rockwella	
$h_5$	Výška zubu	[mm]
$h_a$	Výška hlavy zubu	[mm]
$h_{a5}$	Výška hlavy zubu	[mm]
$h_f$	Výška paty zubu	[mm]
$h_{f5}$	Výška paty zubu	[mm]
$i_{12}$	Převodový poměr mezi satelitem a centrálním kolem	[-]
$i_{35}$	Převodový poměr mezi korunovým kolem a výstupním kolem	[-]
$i_{45}$	Převodový poměr mezi korunovým kolem a výstupním kolem	[-]
$i_c$	Celkový převodový poměr	[-]
$inv\alpha$	Involuta úhlu $\alpha$	[°]
$J_{p1}$	Polární moment	[mm <sup>4</sup> ]
$K_A$	Součinitel vnějších dynamických sil	[-]
$K_{H\alpha} ; K_{F\alpha}$	Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů (pro dotyk a pro ohyb)	[-]
$K_{H\beta} ; K_{F\beta}$	Součinitelé nerovnoměrnosti zatížení jednotlivých zubů po šířce pro dotyk a pro ohyb	[-]
$k_k$	Bezpečnost vzhledem k meznímu stavu pevnosti v krutu	[-]
$k_n$	Návrhový součinitel bezpečnosti	[-]
$K_v$	Součinitel vnitřních dynamických sil v ozubení	[-]
$L_p$	Délka řemene	[mm]
$m$	Modul	[mm]
$m_2$	Modul na vnějším ozubení	[mm]
$M_{K2}$	Kroutící moment na satelitu	[Nm]
$M_{Ke}$	Vstupní kroutící moment	[Nm]
$M_{KSM}$	Výstupní kroutící moment	[Nm]

$M_{KU}$	Kroutící moment unašeče	[Nm]
$m_p$	Modul řemene	[mm]
$n_3$	Otáčky korunového kola	[min <sup>-1</sup> ]
$n_4$	Otáčky korunového kola	[min <sup>-1</sup> ]
$n_e$	Jmenovité vstupní otáčky	[min <sup>-1</sup> ]
$n_{KSM}$	Otáčky kuličkového šroubu s maticí	[min <sup>-1</sup> ]
$p$	Rozteč	[mm]
$p_2$	Rozteč na druhém soukolí	[mm]
$p_b$	Základní rozteč	[mm]
$p_m$	Měrné zatížení	$\left[ \frac{N}{mm^2} \right]$
$p_p$	Rozteč řemene	[mm]
$Q_{ISO}$	Stupeň přesnosti ozubení dle ISO	[-]
$q_a$	Součinitel podílu zatížení jednotlivých zubů	[-]
$R_e$	Mez kluzu ve smyku	[MPa]
$R_{SE}$	Mez kluzu ve smyku	[MPa]
$s$	Tloušťka zubu	[mm]
$s_{34}$	Skutečná tloušťka věnce	[mm]
$s_5$	Tloušťka zubu	[mm]
$S_F$	Součinitel bezpečnosti v ohybu	[-]
$S_{Fmin}$	Minimální hodnota součinitele bezpečnosti v ohybu	[-]
$S_H$	Součinitel bezpečnosti v dotyku	[-]
$S_{Hmin}$	Minimální hodnota součinitele bezpečnosti v dotyku	[-]
$s_{KSM}$	Stoupání kuličkového šroubu s maticí	[mm]
$s_R$	Minimální tloušťka věnce	[mm]
$t$	Provozní teplota	[°C]
$v_{min}$	Minimální vůle mez satelity	[]
$w_{K1}$	Modul průřezu v krutu centrálního kola	[mm <sup>3</sup> ]
$x_1$	Jednotkové posunutí	[mm]
$Y$	Lewisův součinitel	[-]
$z_1$	Počet zubů na prvním kole	[-]
$z_2$	Počet zubů na druhém kole	[-]
$z_3$	Počet zubů na korunovém kole	[-]
$z_4$	Počet zubů na vnějším korunovém kole	[-]
$z_5$	Počet zubů na vnějším korunovém kole	[-]
$Z_B ; Z_D$	Součinitel jednopárového záběru	[-]
$Z_E$	Součinitel spoluzabírajících kol	$[\sqrt{MPa}]$
$Z_H$	Součinitel tvaru spolu zabírajících zubů	[-]
$z_{w4}$	Počet zubů na vnějším ozubení (menší řemenice)	[-]

$Z_{\beta}$	Součinitel sklonu zubů	[-]
$Z_{\varepsilon}$	Součinitel součtové délky dotkových křivek	[-]
$\alpha$	Úhel profilu boku zubů	[°]
$\alpha_a$	Úhel profilu evolventy	[°]
$\alpha_t$	Úhel záběru v čelní rovině	[°]
$\alpha_w$	Úhel záběru soukolí	[°]
$\beta$	Úhel sklonu boku zubu na roztečném válci	[°]
$\varepsilon_{\alpha}$	Součinitel záběru profilu	[°]
$\varepsilon_{\beta}$	Součinitel záběru kroku	[°]
$\varepsilon_{\gamma}$	Součinitel záběru	[°]
$\eta_c$	Účinnost kuličkového šroubu s maticí	[-]
$\theta_{dw}$	Úhel opásání malé řemenice	[rad]
$\theta_{Dw}$	Úhel opásání velké řemenice	[rad]
$\mu$	Poissonovo číslo	[-]
$\sigma_F$	Napětí v ohybu	[MPa]
$\sigma_{F0}$	Nominální napětí v ohybu v patě zubu	[MPa]
$\sigma_{FE}$	Mez únavy ohybu referenčního kola	[MPa]
$\sigma_{Flim}$	Mez únavy v ohybu referenčního ozubeného kola	[MPa]
$\sigma_H$	Napětí v dotyku	[MPa]
$\sigma_{H0}$	Nominální napětí v dotyku	[MPa]
$\sigma_{Hlim}$	Mez únavy v dotyku referenčního ozubeného kola	[MPa]
$\tau_K$	Napětí v krutu	[MPa]
$\tau_{Kc}$	Mez únavy v krutu oceli	[MPa]
$\tau_s$	Napětí ve stříhu	[MPa]



## 9 SEZNAM PŘÍLOH

- Výkresy: První převod – DP-02-00-24  
Satelit – DP-01-02-24  
Kolo s vnitřním a vnějším ozubením – DP-01-03\_04-24  
Skříň převodovky – DP-01-09-24  
Planetová převodovka – DP-01-00-24
- Technické výpočty planetové převodovky  
Technické výpočty ozubeného řemene



