



**FAKULTA
ŠROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Konstrukce řadicí vidličky

Design of the Shift Fork

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2019

Dalibor HANKA

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2301T047 Dopravní, letadlová a transportní technika

Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Gabriela Achtenová

ZADÁNÍ

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Návrh řadicí vidličky“ vypracoval samostatně pod vedením doc. Dr. Ing. Gabriely Achtenové, s použitím literatury, uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury, a cenných rad při konzultacích.

V Mostě 9. 7. 2019

Dalibor Hanka

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat vedoucí mé závěrečné práce, doc. Dr. Ing. Gabriela Achtenové za odborné vedení a připomínky při tvorbě této závěrečné práce a studiu. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Jiřímu Pakostovi, PhD. za rady, pomoc a ochotu při realizaci praktické části diplomové práce, zejména životnostních zkoušek. V neposlední řadě bych chtěl ze srdce poděkovat celé své rodině a blízkým přátelům za oporu, jistotu a zázemí které mi poskytovali při celém vysokoškolském studiu.

ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora:	Dalibor HANKA		
Název DP:	Konstrukce řadicí vidličky		
Anglický název:	Design of the Shift Fork		
Rok:	2019		
Studijní program:	N2301 Strojní inženýrství		
Obor studia:	2301T047 Dopravní, letadlová a transportní technika		
Ústav:	Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel		
Vedoucí BP:	doc. Dr. Ing. Gabriela Achtenová		
Konzultant:			
Bibliografické údaje:	Počet stran		58
	Počet obrázků		57
	Počet tabulek		11
	Počet příloh		11
Klíčová slova:	Převodovka, manuální převodovka, řadicí vidlička, řadicí objímka, prášková metalurgie		
Keywords:	Gearbox, manual gearbox, shift fork, shifting sleeve, powder metallurgy		

Anotace:

Předmětem diplomové práce je konstrukce řadicí vidličky manuální ručně řazené převodovky, konstrukce a výroba prototypů a jejich testování. Na základě omezení a požadavků nové výrobní technologie řadicí objímky je vytvořen prototyp objímky odlišného tvaru, pro který jsou dále navrhnuté řadicí vidličky. Prototypy jsou podrobeny testům funkčnosti a životnosti na zkušebním stavu. Součástí této práce je výkresová dokumentace prototypů, přípravků i navrhnutých řešení.

Abstract:

Design of shift fork for automotive manual gearbox is a subject of this diploma thesis. Based on limitations and requirements of new production technology of shifting sleeve, a new prototype of shifting sleeve is created, for which are new shifting forks then designed. Prototypes are put through functional and durability tests on testing bench in real automotive gearbox. Drawings and CAD models of tested prototypes, custom tools and designed shift forks are part of the thesis.

1. Úvod	1
2. Rešerše.....	2
2.1. Řazení.....	2
2.1.1. Řazení přesuvnými koly	3
2.1.2. Řazení zubovou spojkou	4
2.1.3. Synchronizační spojka Borg Warner.....	4
2.1.4. Vícenásobná synchronizace	7
2.2. Prášková metalurgie.....	8
2.2.1. Kovové prášky	9
2.2.2. Konstrukční omezení	9
2.3. MQ200	11
2.3.1. Rozložení a koncepce převodovky	11
2.3.2. Řadicí mechanismus	13
2.3.3. Vývoj řadicího mechanismu.....	14
2.3.3.1. Starší verze řadicího mechanismu.....	15
2.3.3.2. Nová verze řadicího mechanismu	16
3. Prototypy pro zkoušky na setrvačnickovém stavu	18
3.1. Prototyp řadicí objímky	20
3.1.1. Volba technologie výroby	20
3.1.2. Lepený spoj.....	21
3.1.3. Samotná výroba prototypu objímky	22
3.2. Prototyp řadicích kamenů	24
4. Testování na zkušebním stavu.....	29
4.1. Zkušební stav.....	29
4.2. Zpřesnění měření	30
4.3. Zkoušky	32
4.3.1. Jízdní cykly.....	32
4.3.2. Výběr vůle mezi řadicím kamenem a objímkou	33
4.3.3. Dlouhodobé zkoušky funkčnosti a životnosti	36
4.3.3.1. Synchronizační spojka 5. rychlostního stupně.....	36
4.3.3.2. Synchronizační spojka 3. a 4. rychlostního stupně	37
4.4. Závěr ze zkoušek prototypů.....	41
5. Návrh řadicí vidličky	42
5.1. Řadicí kameny 3. a 4. rychlostního stupně.....	42
5.2. Řadicí vidlička 5. rychlostního stupně.....	46
5.3. MKP analýza navržených řešení.....	51
6. Závěr	52
Seznam zkratk a symbolů.....	53
Seznam použité literatury.....	54
Seznam obrázků.....	55
Seznam tabulek	57
Seznam příloh	58

1. Úvod

Se stále rostoucí produkcí v automobilovém průmyslu roste tlak na co nejnižší výrobní náklady současně s rychlostí výroby. Jednou z možností snížení výrobních nákladů a zvýšení efektivity výroby a hospodaření s materiálem je využití technologie práškové metalurgie místo konvenčního třískového obrábění. Prášková metalurgie zažívá v dnešní době rozmach a je již používána k výrobě celé řady součástí automobilu. Jedná se většinou o části variabilního časování ventilů, méně namáhaná ozubená kola, řemenice atd.

Tato technologie má ovšem svá omezení, která v určitých konkrétních případech neumožňují výrobu totožné součásti jako pomocí konvenčních technologií. V mé diplomové práci se budu zabývat situací, která nastane při výrobě řadicí objímky ručně řazené mechanické převodovky (MQ200 od firmy Škoda Auto) pomocí práškové metalurgie. Konkrétně nutným úpravám řadicích vidliček a kamenů z důvodu úprav tvaru řadicí objímky pro novou technologii výroby.

Cílem této práce je návrh prototypů pro ověření funkčnosti nového tvaru řadicí objímky, výroba prototypů, zkoušky jejich funkčnosti a životnosti a nakonec s pomocí výsledků zkoušek zpracování možného konstrukčního řešení řadicí vidličky a kamenů do podoby výrobních výkresů.

2. Rešerše

Pro získání dostatečných informací ke splnění požadavků této závěrečné práce se v rešeršní části zaměřuji na používané mechanismy řazení rychlostních stupňů v ručně řazených převodovkách, základní konstrukční omezení práškové metalurgie a použitou mechanickou převodovku MQ200. V následujícím textu detailněji rozeberu všechny tři oblasti.

2.1. Řazení

Z důvodu malého pracovního rozsahu otáček spalovacího motoru v automobilech (1000 – 7500 ot/min) a nemožnosti běhu spalovacího motoru od nulových otáček je ve všech vozidlech poháněných spalovacím motorem potřeba převodovka.

Každá automobilová převodovka má určitý převodový rozsah, a kromě speciální typů převodovek (CVT, IVT, ...), má tento rozsah nespojitě rozdělen na jednotlivé převodové stupně (obvykle minimálně 5). Tok výkonu je tedy třeba měnit podle toho, který převodový stupeň je v konkrétní provozní situaci žádoucí. Tento proces se nazývá řazení a je možno ho realizovat více způsoby. [1]

Řazení se dá rozdělit na dva typy. Řazení bez přerušování toku výkonu – uplatňuje se u automatických převodovek. A řazení s přerušováním toku výkonu – všechny ručně řazené mechanické převodovky. Další text se týká řazení s přerušováním toku výkonu.

Při řazení za jízdy dochází ke kinematickému spojení ozubených kol, která mají před zahájením řazení jiné úhlové rychlosti. Aby bylo zařazení úspěšné, komfortní a převodovka měla dostatečnou životnost, je třeba zajistit vyrovnání úhlových rychlostí v okamžiku zařazení kinematicky spojovaných ozubení. Synchronizace (vyrovnání) otáček je realizována buď jako vnitřní, nebo vnější.

Prvním, klasickým, způsobem je vnitřní synchronizace. Jedná se o vyrovnání otáček obou řazených ozubených kol během procesu například pomocí třecích kuželů.

Vnější synchronizace spočívá v roztočení nebo zpomalení vstupní hřídele převodovky pomocí spalovacího motoru nebo přídavného elektromotoru. Tento způsob synchronizace spalovacím motorem, tzv. meziplýn, se používal před nasazením synchronizačních spojek.

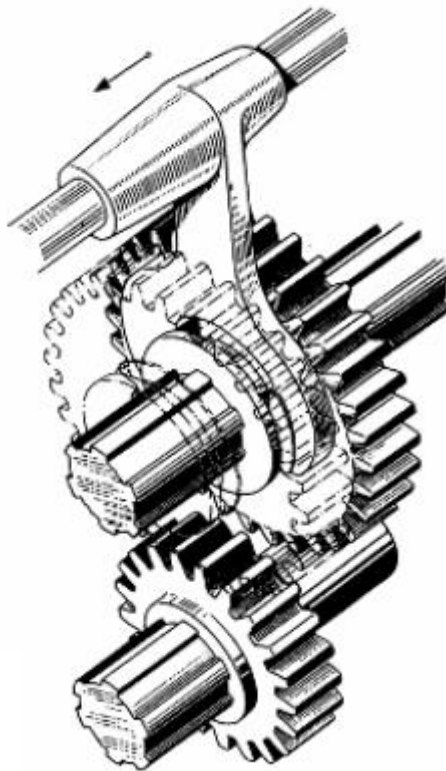
Avšak v poslední době s nástupem hybridních pohonů se začíná vnější synchronizace pomocí elektromotoru opět objevovat.

2.1.1. Řazení přesuvnými koly

Jedná se o nejjednodušší formu řazení. Jedno z ozubených kol je axiálně pevné a druhé posuvné – k zařazení dojde posunutím jednoho z kol do záběru s druhým – tento princip vyžaduje ozubení s přímými zuby.

Ozubená kola nejsou nijak synchronizována, proto je velmi obtížné je za jízdy zařadit bez ohledu na synchronizaci. V dnešní době se používá pouze u levnějších automobilových převodovek pro řazení zpátečky, kde se uplatní výhoda změny smyslu otáčení přidáním dalšího ozubeného kola do záběru. Zpětný chod je řazen takřka výlučně při zastaveném vozidle a vozidlo se na zpátečku pohybuje pomalými rychlostmi a krátký čas, takže absence synchronizace a zvýšený hluk emitovaný záběrem přímých zubů nijak neovlivňuje funkčnost a komfort užívání. [1]

Následující obrázek (Obrázek 1) znázorňuje princip.

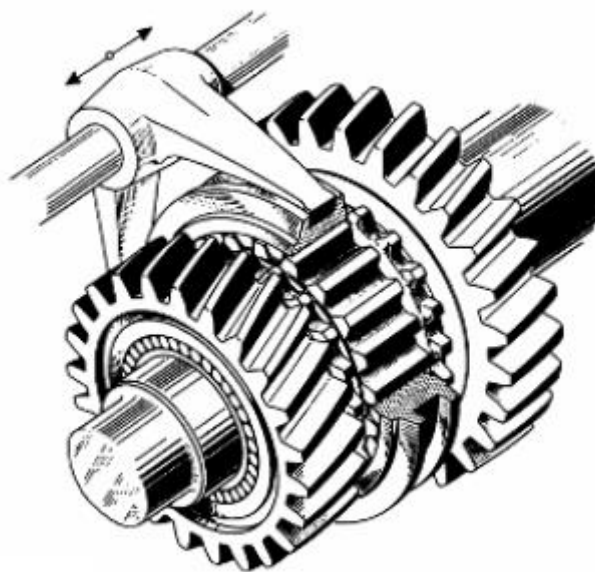


Obrázek 1: Řazení přesuvnými koly [1]

2.1.2. Řazení zubovou spojkou

Hlavním rozdílem oproti přesuvným kolům je fakt, že ozubená kola v převodovce jsou ve stálém záběru. Vždy jedno z páru je pevně spojeno s hřídelí převodovky a druhé se protáčí na jehlových ložiskách. Řazení tedy neprobíhá v rámci ozubení mechanického převodu, ale je realizováno zubovou spojkou mezi ozubeným kolem na jehlových ložiskách a samotnou hřídelí převodovky – konkrétně převlečnou řadicí objímkou, která svým axiálním posuvem vyvozeným silou od řadicí vidličky zajistí kinematickou vazbu. Fakt, že jsou kola mechanického převodu ve stálém záběru umožňuje použití šikmého ozubení, což pozitivně ovlivňuje parametry záběru a zejména hlučnost převodovky.

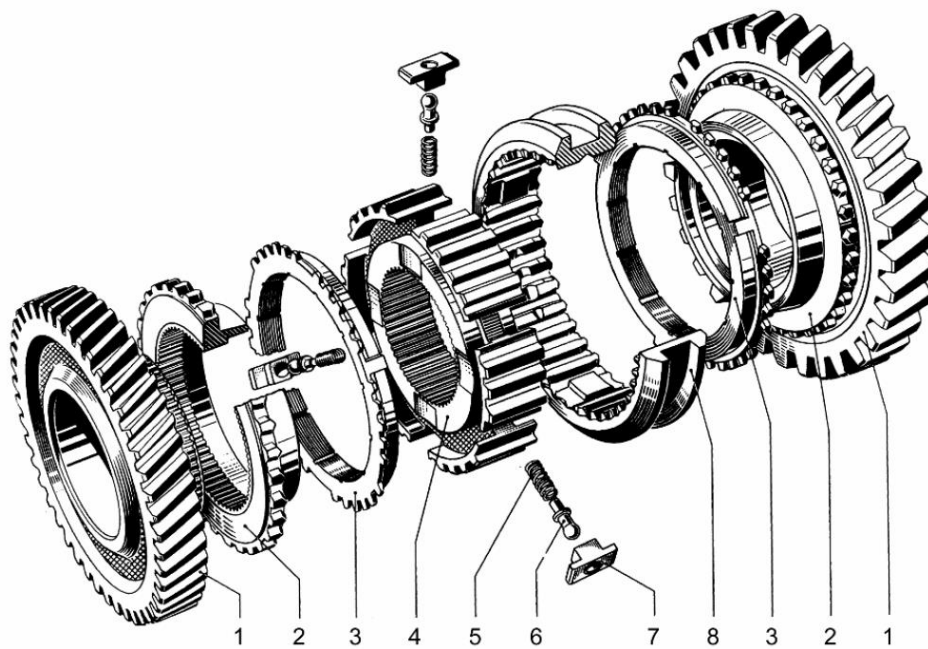
Další obrázek (Obrázek 2) ilustruje zubovou spojkou bez synchronizace.



Obrázek 2: Řazení zubovou spojkou bez synchronizace [1]

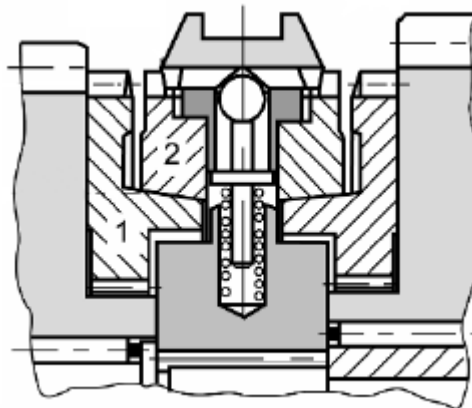
2.1.3. Synchronizační spojka Borg Warner

Výše popsaný princip řazení zubovou spojkou umožňuje zástavbu synchronizačního mechanismu. Typickým příkladem nejrozšířenějšího systému je synchronizační spojka *Borg-Warner* (Obrázek 3).



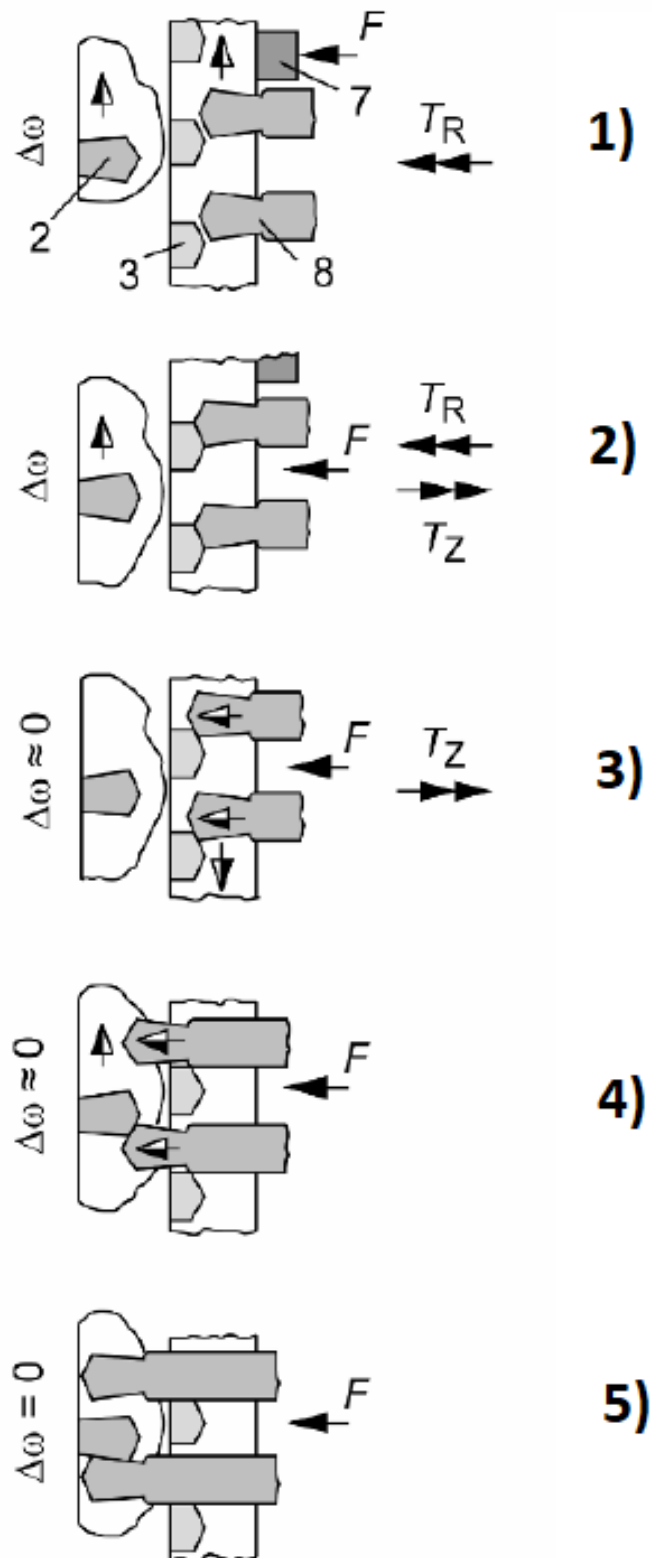
Obrázek 3: Rozpad synchronizační spojky Borg-Warner [1]

1 – Volně otočné kolo na jehlových ložiskách, **2** – řadicí ozubení pevně spojené s volně otočným kolem, **3** – clonící kroužek se synchronizačním kuželem a blokovacím ozubením, **4** – náboj synchronizační spojky pevně spojený s hřídelí převodovky a vnějším řadicím ozubením, **5** – tlačná pružina, **6** – kulička, **7** – aretační kamen, **8** – řadicí objímka s vnitřním řadicím ozubením



Obrázek 4: Řez synchronizační spojkou Borg Warner [1]

Jedná se o spojku s jištěnou synchronizací. Jištění je realizováno blokovacím ozubením synchronizačního kroužku, které znemožňuje dokončení řazení před synchronizací otáček. Proces řazení podrobně popisuje následující obrázek (Obrázek 5).



Obrázek 5: Proces řazení s jištěnou synchronizací [1]

Čísla jednotlivých součástí jsou shodná s předchozím obrázkem (Obrázek 3). F značí řadicí sílu, T_R třecí krouticí moment působící na clonící kroužek, T_Z krouticí moment od dotyku mezi ozubením (3) a (8) působící na clonící kroužek.

Řazení začíná první fází (**1**), která se nazývá *ASYNCHRONIZACE*. Řadící síla vyvolá axiální posuv řadící objímky a ta přes kuličku posune aretační kamen, který zatlačí na clonící kroužek. Clonící kroužek se dostane do kontaktu s kuželovou plochou na volně otočném ozubeném kole a začne na něj působit třecí kroutící moment T_R . Tento kroutící moment a rozdíl otáček mezi řadící objímkou a clonícím kroužkem natočí clonící kroužek vůči řadící objímce, než dojde ke kontaktu ozubení na kroužku s ozubením v objímce.

Při dalším působení řadící síly dochází k přenosu axiální síly přes zkosená čela ozubení clonícího kroužku a řadící objímky a nastává vlastní *SYNCHRONIZACE* (fáze **2**). Působením řadící síly přes zkosená čela zubů vzniká další kroutící moment T_Z . Jeho směr je opačný než u třecího kroutícího momentu, takže se snaží o pootočení clonícího kroužku proti směru otáčení volně otočného ozubeného kola a tím uvolnění cesty pro řadící objímku a dořazení. Jeho velikost je ale kvůli rozdílu otáček mezi clonícím kroužkem a kuželové ploše na volně otočném kole menší než velikost momentu třecího. Tento fakt zajišťuje dříve zmíněné jištění – dokončení řazení není možné, dokud se nevyrovnají otáčky objímky a volně otočného kola.

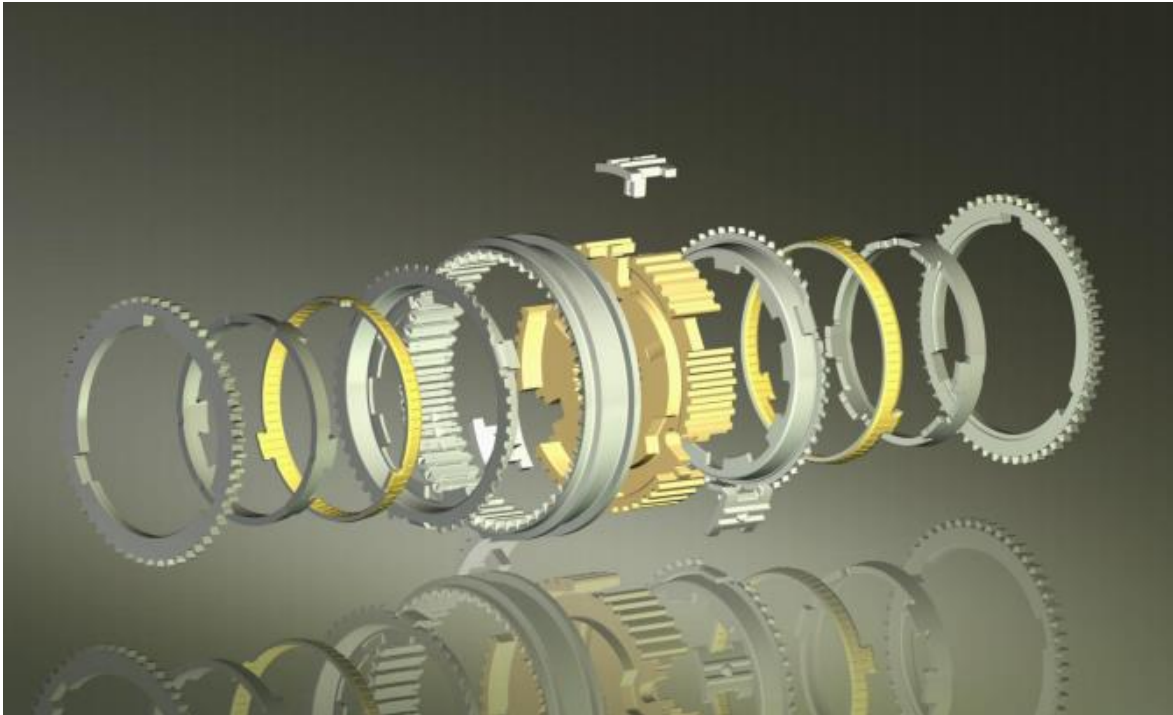
Po vyrovnání otáček dojde k poklesu třecího momentu. Moment od ozubení způsobí pootočení clonícího kroužku a otevře cestu řadící objímce. Dojde tedy ke třetí fázi – *ODBLOKOVÁNÍ SYNCHRONIZACE* (**3**).

Při dalším posunutí řadící objímky dojde k *DOKONČENÍ ŘAZENÍ* (Fáze **4** a **5**). [1]

2.1.4. Vícenásobná synchronizace

Doba synchronizace je závislá na řadící síle, momentu setrvačnosti synchronizovaných hmot a tedy i převodovém poměru. V ručně řazených převodovkách je snaha o zachování konstantní řadící síly a rozumného času synchronizace napříč všemi převodovými stupni. Tento požadavek zapříčinil nasazení vícenásobné synchronizace u nižších převodových stupňů (zpravidla I. a II. stupeň).

Princip (Obrázek 6) je totožný s jednoduchou synchronizací, akorát je zvýšen počet třecích ploch vložení dalšího synchronizačního kroužku (na dva nebo tři synchronizační kužele). Tím je zajištěno zvýšení rychlosti synchronizace, respektive snížení řadící síly. [1]



Obrázek 6: Synchronizační spojka s dvojitým třecím kuželem [3]

2.2. Prášková metalurgie

Prášková metalurgie je moderní technologie výroby součástí. Je založena na výrobě součástí požadovaných rozměrů a tvarů z kovového prachu. Základem této technologie je komprese kovového prachu ve formě. Po kompresi prášku následuje zahřívání, tzv. sintrování, které nastartuje pojící procesy v materiálu a zapříčiní jeho konečnou pevnost.

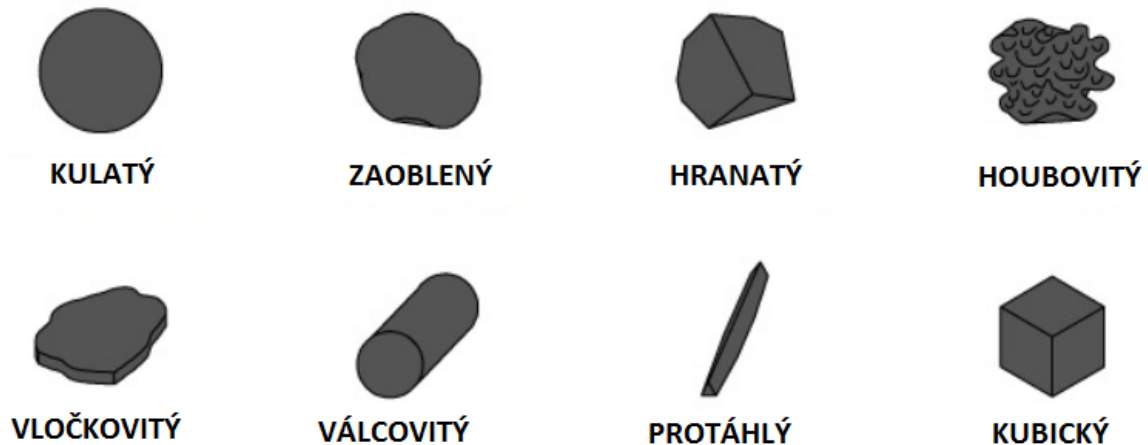
Oba děje mohou nastávat i najednou – v tom případě se jedná o prachové kování. Konkrétní metody zpracování kovových prášků se liší a jejich detailní popis je nad rámec této závěrečné práce.

Hlavní výhoda technologie spočívá v úspoře materiálu a vyšší rychlosti produkce oproti konvenčnímu třískovému obrábění, samozřejmě pouze za předpokladu, že je vyráběný díl svým tvarem vhodný pro tuto technologii.

Na rozdíl od konvenčních technologií má prášková metalurgie jiná omezení, co se týče tvaru dílů. Umožňuje výrobu složitých tvarů, které jsou těžko realizovatelné konvenčně, ale zároveň není schopna, nebo jen velmi složitě a nákladně, vyrobit zahlobení a tvary, které jsou snadno obrobitelné konvenčními technologiemi. [4] [5]

2.2.1. Kovové prášky

Prášky jsou vyráběny různými technologiemi jako je například: drcení, broušení, chemické reakce nebo elektrolytické usazování. Výsledkem je vždy prach o určité zrnitosti (počet mezer v sítu na 1 palec – např. zrnitost 100 znamená 10 000 mezer v sítu na 1 palec²) a tvaru částice (nejběžnější tvary ukazuje Obrázek 7). [4]

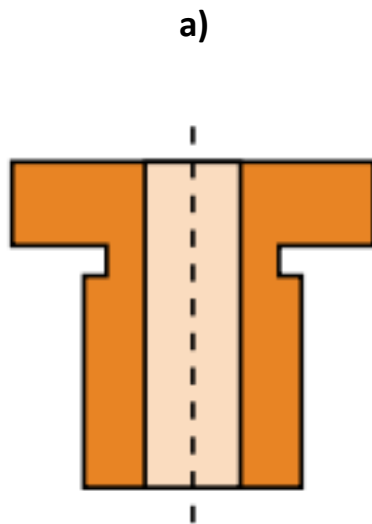


Obrázek 7: Tvary částic kovových prášků [4]

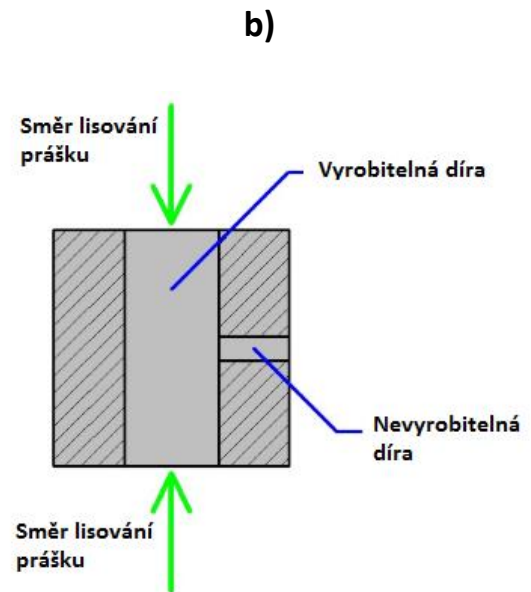
2.2.2. Konstrukční omezení

Prášková metalurgie má z důvodu lisování prášku ve formách svá konstrukční omezení. Hlavní z nich se pokusím ve zkratce popsat v této kapitole, detailně o nich pojednává publikace [7].

- Tvar musí být takový, aby bylo možné výrobek po dokončení výroby vyjmout z formy.
- Díry mohou být pouze ve směru lisování (nelze vytvořit díry kolmé ke směru komprese prášku).
- Všechna zahlobení a díry by měly mít zaoblené hrany (větší životnost formy a lisovací raznice a eliminace koncentrace napětí v hotovém dílu).
- Zaoblení na hranách součástí jsou nemožné vyrobit (hrana raznice by měla na konci velmi malou plochu – opotřebení).



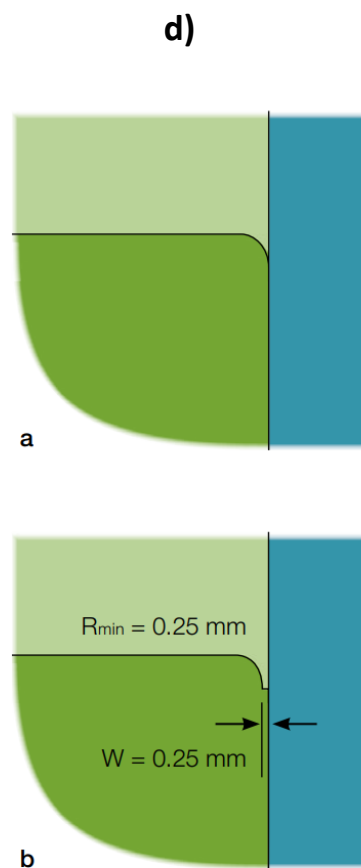
Obrázek 8: Nevyrobitelná drážka [7]



Obrázek 9: Nevyrobitelná díra [4]



Obrázek 10: Vlevo možné provedení hran, vpravo vhodné zaoblení hran [7]



Obrázek 11: a) nevyrobitelné zaoblení, b) nutné odsazení u konce zaoblení [7]

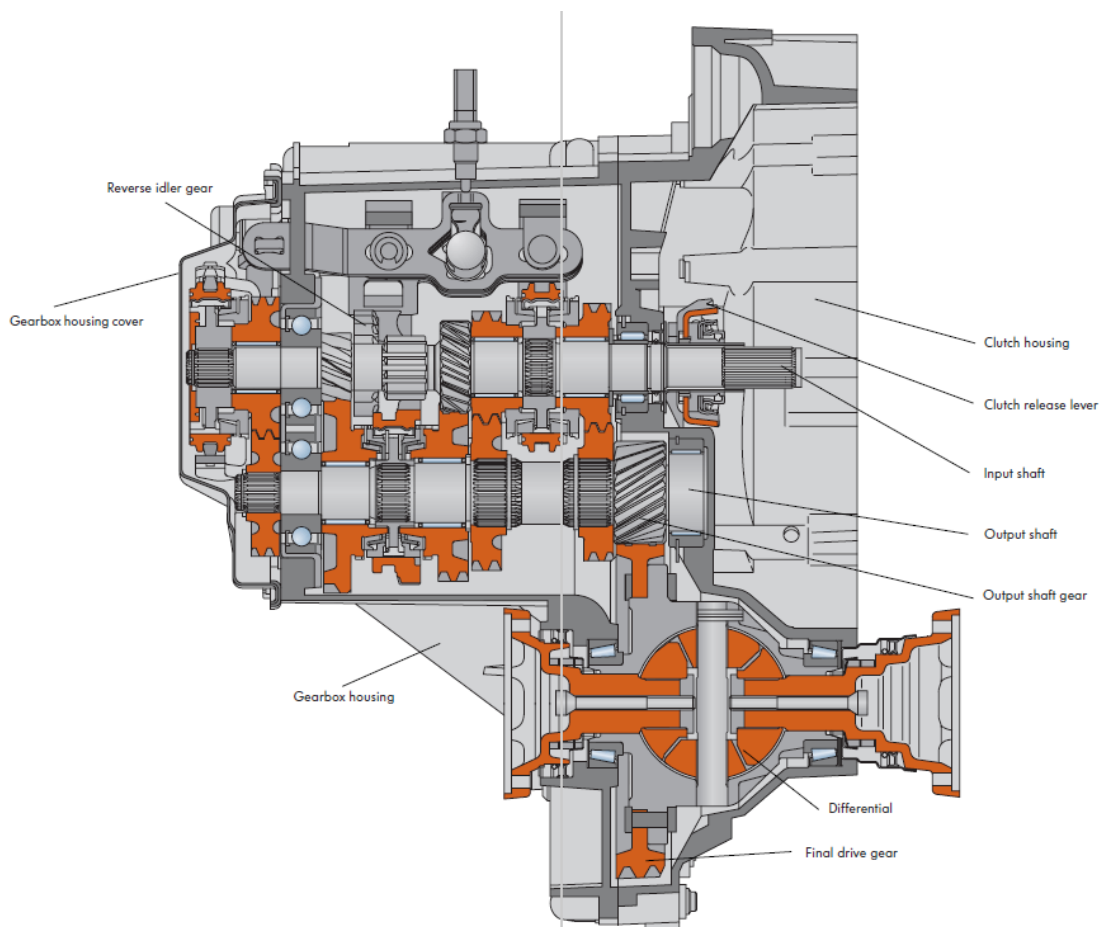
2.3. MQ200

Převodovka MQ200 je mechanická ručně řazená převodovka od firmy Škoda Auto a.s. Je na trhu od roku 2000, vyrábí se v pětirychlostním a šestirychlostním provedení a jak její název napovídá, je schopna přenést kroutící moment o velikosti maximálně 200 Nm.

Vzhledem ke své momentové kapacitě je nasazována do vozů koncernu VW se zážehovými agregáty o objemu 1,0 až 1,6 litru. Je určena k příčné zástavbě do vozů s předním pohonem. Současná (2018) výrobní kapacita převodovek MQ200 v Mladé Boleslavi je až 1 500 kusů denně. [9], [10]

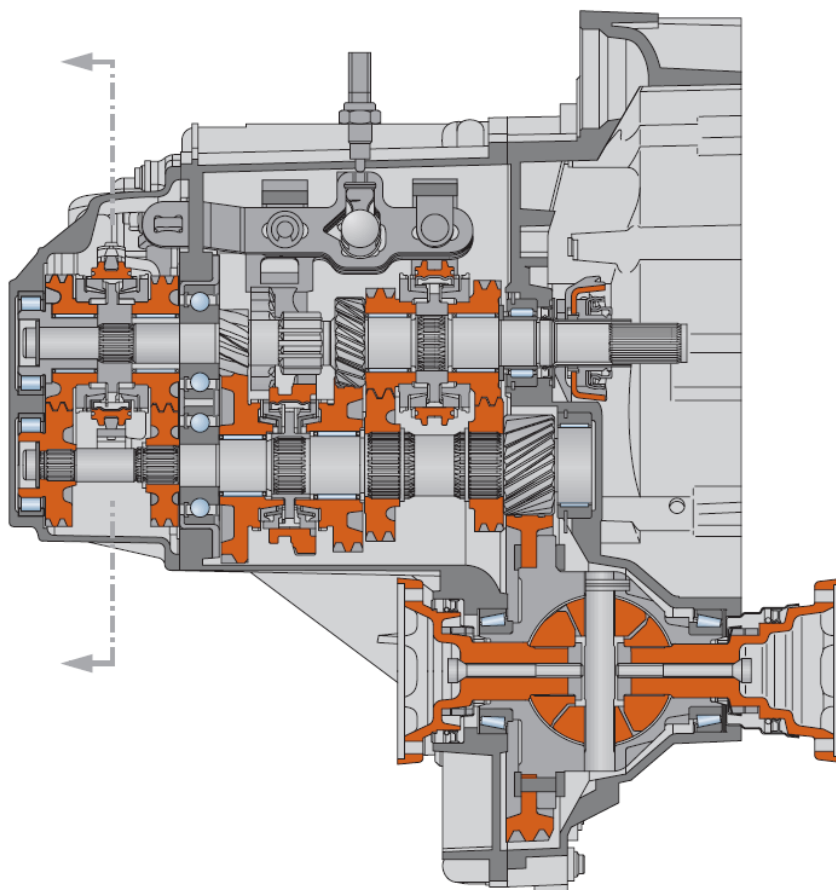
2.3.1. Rozložení a koncepce převodovky

Převodovka je koncipována jako dvouhřídelová – se vstupní hřídelí poháněnou přes suchou třecí spojku od spalovacího motoru a výstupní hřídelí, která přes stálý převod přenáší výkon na korunové kolo diferenciálu, který je součástí skříně převodovky vyrobené z hořčíkové slitiny.



Obrázek 12: Řez převodovkou MQ200 – pětirychlostní provedení [3]

Jak je vidět na předchozím obrázku (Obrázek 12) obě hřídele jsou v případě pětirychlostního provedení uloženy na dvou ložiskách. Mezi ložisky jsou umístěny čtyři dopředné rychlostní stupně, zatímco pátý rychlostní stupeň je uložen letmo na samém konci obou hřídelů. Letmo uložený pár kol je kryt plechovým víkem.



Obrázek 13: Řez převodovkou MQ200 – šestirychlostní provedení [3]

V případě šestirychlostního provedení (Obrázek 13) již má každá hřídel tři ložiska, protože letmé uložení pátého i šestého rychlostního stupně by vyvozovalo moc velký ohybový moment na hřídele. Skříň je v tomto případě stejná jako u pětirychlostního provedení, ale víko převodovky pro šestý a pátý stupeň je vyrobeno ze slitiny hliníku. Obsahuje ložiskové domky pro třetí ložiska obou hřídelů. Šestistupňová převodovka má tedy všechny převodové stupně uložené mezi ložisky.

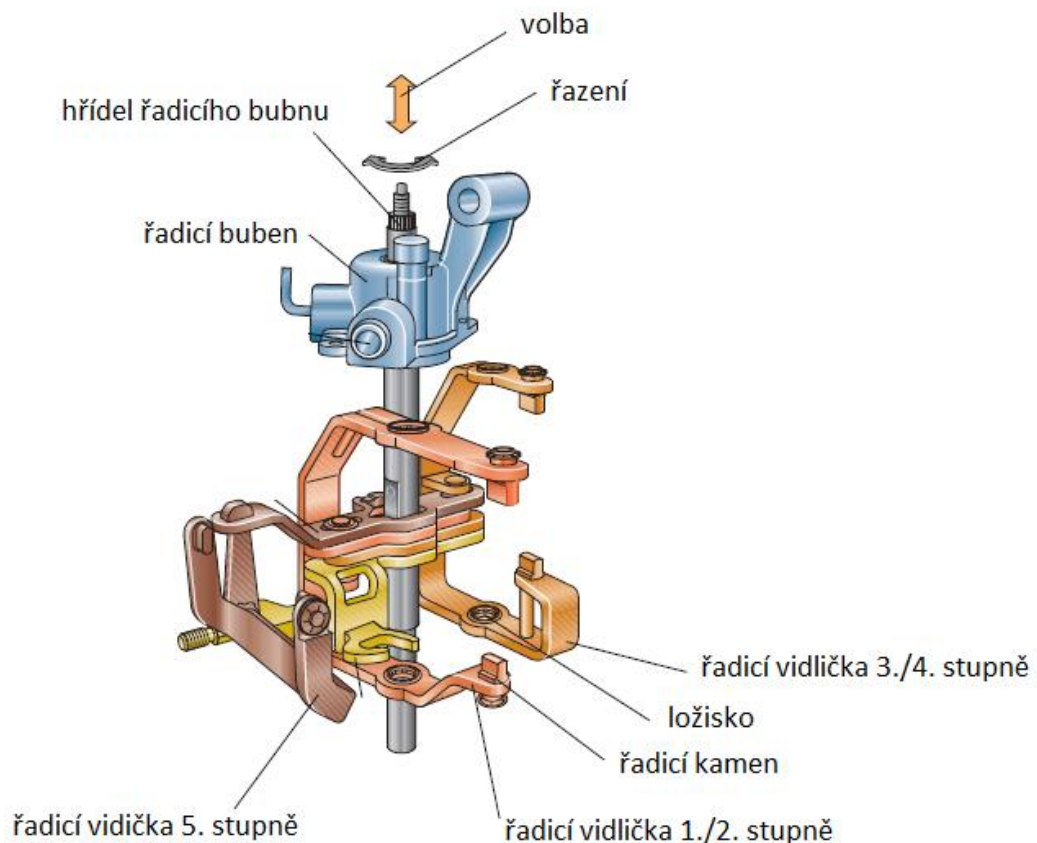
Celou svou závěrečnou práci budu provádět na pětirychlostním provedení převodovky MQ200 PSU.

2.3.2. Řadicí mechanismus

Řazení rychlostních stupňů je zabezpečeno pomocí synchronizačních spojek typu Borg-Warner (kap. 2.1.3). První dva rychlostní stupně využívají dvojitou synchronizaci, zatímco zbylé stupně již jednoduchou synchronizaci.

Posuv objímek synchronizačních spojek je vyvozen vnitřním řadicím mechanismem převodovky. Ten je tvořen sestavou plechů a řadicích vidliček obsahujících řadicí kameny přicházející do přímého kontaktu s otáčejícími se řadicími objímkami. Řadicí vidličky pro první čtyři rychlostní stupně jsou ve skříní uloženy na ložiskách, zatímco vidlička pátého stupně pouze na kluzném čepu.

Následující obrázek (Obrázek 14) zobrazuje starší verzi řadicího mechanismu. Od současné verze se liší konkrétním provedením vidliček (materiál, výrobní postup, ...) a řadicích kamenů, avšak princip a kinematika mechanismu je totožná.



Obrázek 14: Řadicí mechanismus MQ200 – ilustrace, starší verze [3]

Řadicí mechanismus, konkrétně hřídel řadicího bubnu je ovládána pomocí pohybů řadicí páky ve vozidle. Ta je s převodovkou spojena pomocí dvou lanovodů.

Při pohybu pákou do stran provádíme takzvanou „volbu“. Tato volba je v řadicím mechanismu reprezentována svislým pohybem řadicí hřídele a výběrem konkrétního „patra“ – řadicí vidličky (například pohyb pákou doprava vyvede pohyb hřídele směrem vzhůru a tím pádem je vybrána tmavě hnědá vidlička – vidlička 5. stupně).

Při pohybu řadicí pákou dopředu nebo dozadu provádíme řazení. Řazení je v řadicím mechanismu reprezentováno otočením hřídele řadicího bubnu. Protože má hřídel řadicího bubnu na sobě výstupek, tak její natočení vyvede posunutí aktuálně vybraného „patra“ (v případě pohybu páky dopředu při předchozí volbě doprava je vyvozeno natočení hřídele řadicího bubnu po směru hodinových ručiček při pohledu shora – zařazení 5. rychlostního stupně).

2.3.3. Vývoj řadicího mechanismu

Vzhledem k faktu, že je převodovka MQ200 na trhu od roku 2000, je jasné, že za skoro 20 let prošla řadou inovací. Jednou z oblastí vývoje byl i řadicí mechanismus.

Kromě materiálů a technologie výroby se měnil i druh řadicích kamenů na 3. a 4. rychlostním stupni. Ve starších verzích byla řadicí objímka 3. a 4. stupně ovládána pomocí kamenů s dvoubodovým stykem (Obrázek 14 – oranžová vidlička). Později byly dva mosazné řadicí kameny spojeny mosazným půlměsícem zajišťujícím tříbodový styk (Obrázek 15).

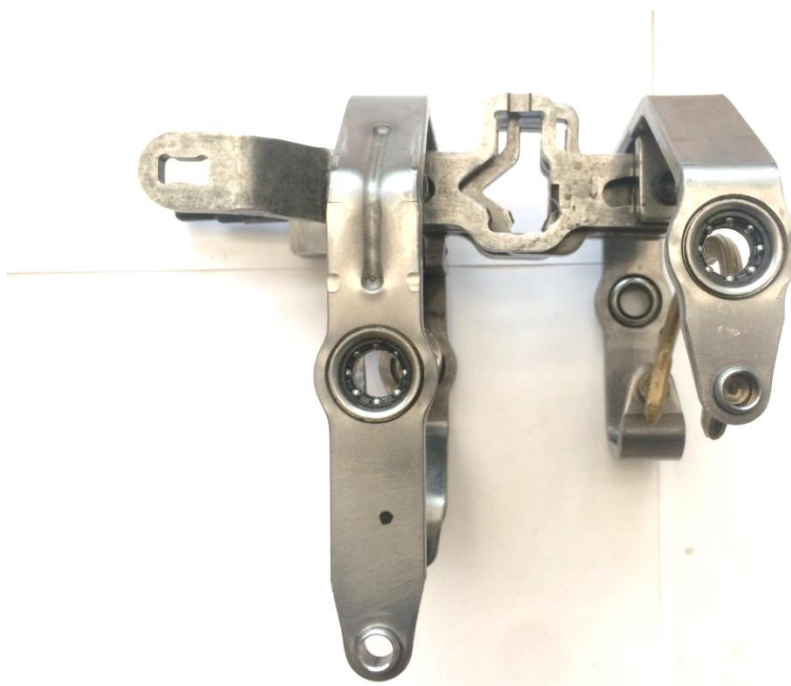
Tříbodový styk kamene s objímkou nezajišťuje přenos řadicí síly třemi body, ale slouží pouze pro vzájemné kinematické svázání natočení obou kamenů ve vidličce – zabraňuje křížení kamenů vůči sobě a zároveň zajišťuje, že jsou po celou dobu pohybu kameny natočené kolmo na dosedací plochu objímky.



Obrázek 15: Půlměsíkový řadicí kamen s trojbodovým stykem

2.3.3.1. Starší verze řadicího mechanismu

Při začátku mé práce jsem měl k dispozici řadicí mechanismus vyobrazený na následujícím obrázku (Obrázek 16). Je vyroben z plechu o tloušťce 6 mm a obsahuje vidličky s otočnými řadicími kameny o obdélníkovém průřezu pro 1./2. a 5. rychlostní stupeň (Obrázek 17) vyrobenými buď z bronzu, nebo z oceli s kluznou bronzovou vrstvou. Řazení 3. a 4. rychlostního stupně je realizováno pomocí půlměsíkového bronzového kamene.



Obrázek 16: Řadicí mechanismus MQ200 – starší verze

Řadicí vidlička pátého stupně je vyrobena ze stejného materiálu a obsahuje taktěž otočné řadicí kameny (Obrázek 18).



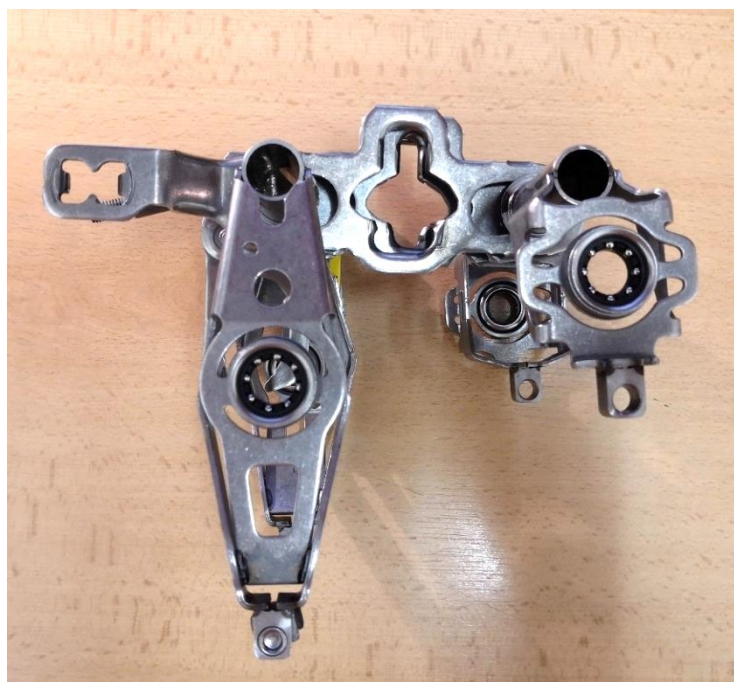
Obrázek 17: Vyjímatelné řadicí kameny



Obrázek 18: Řadicí vidlička V. rychlostního stupně (starší verze)

2.3.3.2. Nová verze řadicího mechanismu

V průběhu práce jsem došel ke zjištění, že jsou současné převodovky vybaveny novou verzí řadicího mechanismu (Obrázek 19). Jak bylo zmíněno dříve (kap. 2.3.2) jedná se o kinematically shodný mechanismus s jinou technologií výroby a jinými použitými materiály.



Obrázek 19: Řadicí mechanismus MQ200 – nová verze

Hlavní změnou je použitý materiál – vidličky jsou laserově svařené z velmi profilovaného plechu o tloušťce 2mm. Další podstatnou změnu doznaly řadicí kameny – jejich jádro je vyrobeno z oceli a na jejich povrchu je nalisovaný plastový návlek.

Řadicí kamen 3. a 4. rychlostního stupně je nadále s tříbodovým stykem, nicméně je realizován totožně jako kameny na 1. a 2. rychlostním stupni pouze s laserově přivařeným obloukem mezi kameny pro třetí bod dotyku (Obrázek 20).



Obrázek 20: Nová verze řadicích kamenů s tříbodovým stykem (zakroužkováno)

Nejpodstatnější rozdíl oproti předchozímu řadicímu mechanismu je řešení řadicí vidličky pátého rychlostního stupně (Obrázek 21). Nová verze totiž už neobsahuje otočné řadicí kameny, ale je osazena pevnými plastovými výlisky se zaoblenou dotykovou plochou (Obrázek 22).



Obrázek 21: Řadicí vidlička V. rychlostního stupně (nová verze)



Obrázek 22: Řadicí kamen V. rychlostního stupně (nová verze)

3. Prototypy pro zkoušky na setrvačnickovém stavu

Vzhledem k omezením práškové metalurgie popsaným v kapitole 2.2.2 bylo potřeba navrhnout nový tvar řadicí objímky vyrobitelný práškovou metalurgií. Místo dosavadního řešení, kde řadicí kamen zapadá do drážky v řadicí objímce jsem navrhl opačný princip. Řadicí objímka s výstupkem bude zapadat do řadicích kamenů s drážkou uprostřed. Pro názornost další dva obrázky ukazují původní, pomocí práškové metalurgie nevyrobitelný, tvar řadicí objímky (Obrázek 23) a navržený prototyp (Obrázek 24).



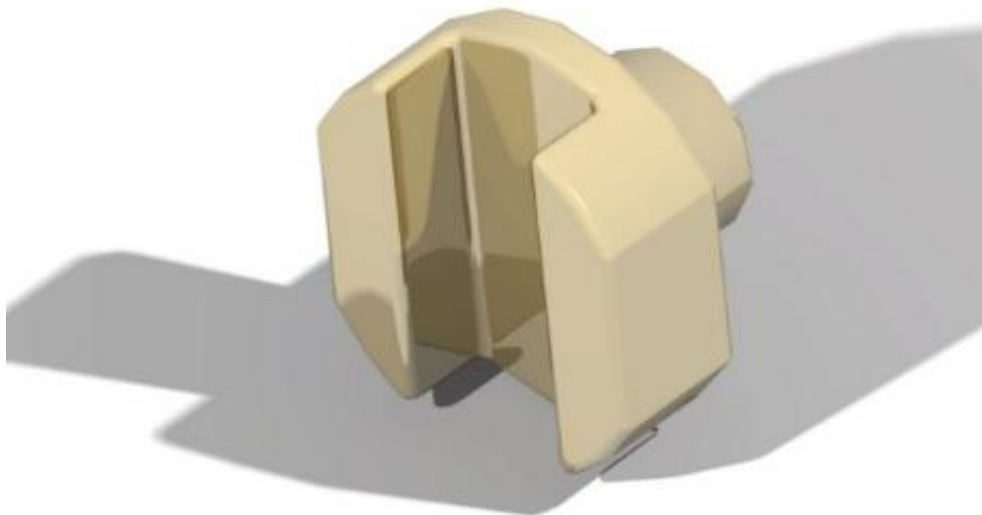
Obrázek 23: Původní řadicí objímka s drážkou



Obrázek 24: Model prototypu řadicí objímky

V mé diplomové práci budu uvažovat nasazení nové objímky do řadicích spojek 3. a 4. rychlostního stupně a 5. rychlostního stupně. Objímka pro první dva rychlostní stupně má na sobě vnější ozubení zpátečky – její výroba práškovou metalurgií by byla složitá a stejně by vyžadovala dodatečné třískové obrábění.

Vycházel jsem z původní geometrie objímky a řadicího kamene a navrhl tvar nové objímky a kamenů jako přesný negativ. Zachoval jsem rozměry kontaktních ploch a velikosti radiálních vůlí. Další obrázky (Obrázek 25 a Obrázek 26) ukazují model řadicího kamene a zjednodušené sestavy.



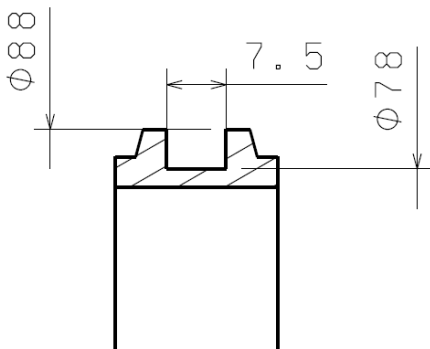
Obrázek 25: Model prototypu řadicího kamene



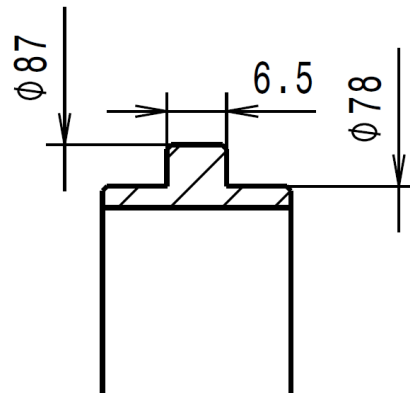
Obrázek 26: Zjednodušený model sestavy

3.1. Prototyp řadicí objímky

Vzhledem k nákladnosti výroby prototypu technologií práškové metalurgie jsem se rozhodl simulovat nový tvar objímky konvenčními technologiemi. Základem pro výrobu prototypu byla původní objímka, kterou bylo potřeba obrobit na průměr 78 mm a následně na ni připevnit kroužek. Výsledný navržený tvar prototypu a rozměry původní řadicí objímky znázorňují následující obrázky (Obrázek 27 a Obrázek 28):



Obrázek 27: Rozměry původní objímky
(bez tolerancí)



Obrázek 28: Rozměry prototypu objímky
(bez tolerancí)

Kroužek prototypu řadicí objímky je užší a nižší než drážka v originální objímce, protože jsem zvolil jeho tloušťku a výšku totožnou jako je tloušťka a výška originálních řadicích kamenů, abych zachoval původní radiální i axiální vůle.

3.1.1. Volba technologie výroby

Jak zmiňuji výše, bylo potřeba připevnit na obrobenou objímku ocelový kroužek. Rozhodoval jsem se mezi variantou nalisovaného spoje a použitím lepidla. Dvě hlavní kritéria pro volbu technologie byla únosnost spoje a náročnost na provedení.

Řadicí objímka v originální podobě musí být schopna přenést jednorázově sílu cca 1000 N (údaj výrobce). Z tohoto požadavku jsem vycházel při volbě technologie výroby.

Kroužek o šířce 6,5 mm a vnitřním průměru 78 mm má kontaktní plochu s objímkou:

$$A_{ob} = \pi \cdot D_{ob} \cdot h_{kr} = \pi \cdot 78 \cdot 6,5 = 1\,592,79 \text{ mm}^2 \quad (1)$$

Při této kontaktní ploše a požadavku na přenesenou sílu 1 000 N vychází smykové napětí ve spoji:

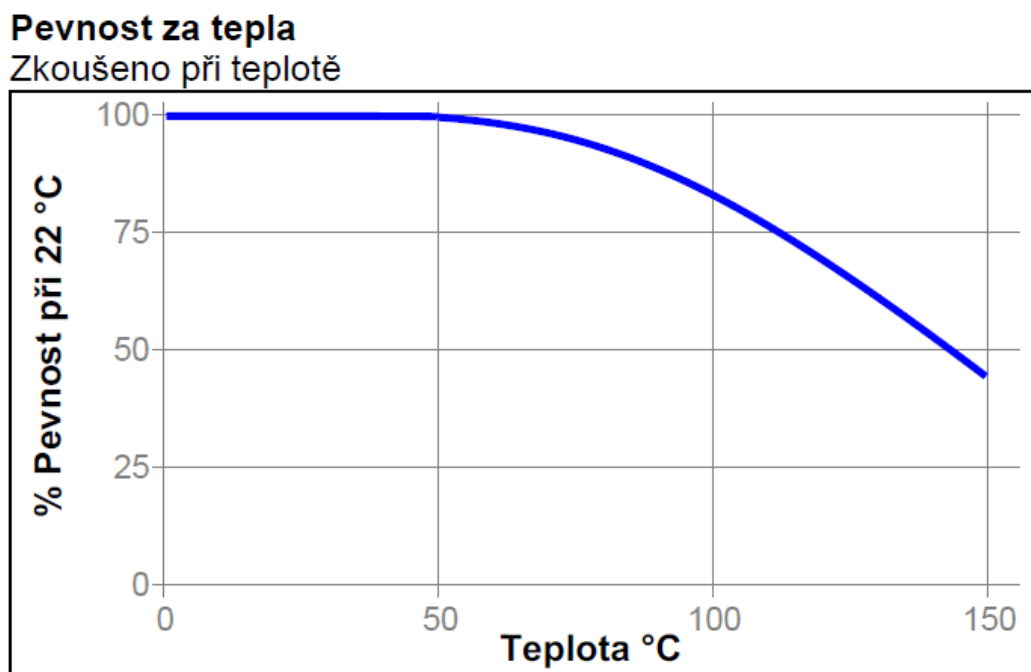
$$\tau_s = \frac{F_{ob}}{A_{ob}} = \frac{1\,000}{1\,592,79} = 0,63\,MPa \quad (2)$$

Vzhledem k nízkému smykovému napětí ve spoji jsem se rozhodl pro lepený spoj. Jedná se o mnohem jednodušší technologii, která nevyžaduje tak přesné rozměry obou dílů a spoj je lépe a opakovaně rozebíratelný.

3.1.2. Lepený spoj

K lepení jsem si vybral lepidlo Loctite 638. Jedná se o akrylátové vysokopevnostní lepidlo určené pro spojování lícovaných válcových součástí se spárou max. 0,25 mm. Pevnost ve smyku lepeného spoje je větší než 25 MPa, což je řádově více, než je pro tuto aplikaci potřeba ($\tau_s = 0,63\,MPa$). [11]

Lepidlo je odolné motorovému oleji, rázům a vibracím. Teplotní odolnost ukazuje následující graf (Obrázek 29):



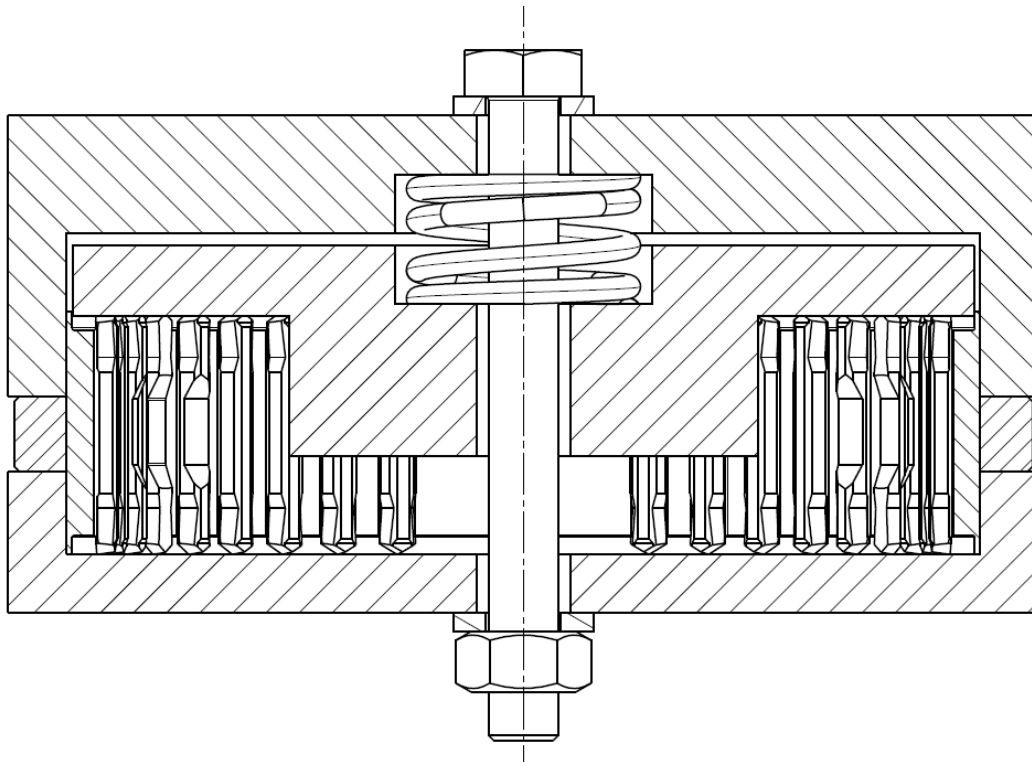
Obrázek 29: Graf závislosti pevnosti lepeného spoje na teplotě [11]

Teplota převodového oleje dosahuje v převodovce hodnot maximálně okolo 80 - 90°C, což dle grafu odpovídá poklesu pevnosti lepeného spoje na cca 80% jeho původní hodnoty tj. cca 20 MPa.

Dle výrobce jsou spoje realizovatelné pro součásti s vůlí, s přesahem i nalisované, což mi dává dostatečnou volnost při výběru uložení mezi kroužkem a objímkou.

3.1.3. Samotná výroba prototypu objímky

Po výběru technologie výroby bylo potřeba zajistit přesné ustavení kroužku vůči obrobené objímce po celou dobu vytvrzování lepidla. Pro tento účel jsem navrhl následující přípravek (Obrázek 30 a Obrázek 31):



Obrázek 30: Přípravek pro výrobu prototypu řadicí objímky – řez



Obrázek 31: Přípravek pro výrobu prototypu řadicí objímky – rozebraný stav

Skládá se ze tří částí; spodní základny (pozice (1)), vnitřního víka (pozice (2)) a vnějšího víka (pozice (3)). Jeho rozměry jsou navrženy tak, že zajišťuje polohu lepeného kroužku přesně uprostřed objímky. Objímka je zároveň přitlačována vnitřním víkem k základně, aby nemohlo dojít k jejímu posunutí směrem od základny. Síla mezi vnitřním a vnějším víkem je vyvozena tlačnou pružinou. Celá sestava je zvenku sešroubována.

Rozměrové tolerance obrobené objímky, vnitřního průměru kroužku a vnitřního průměru základny přípravku jsem zvolil následovně: Objímka je usazena do základny přípravku s nepatrnou vůlí umožňující její bezproblémové vyjmutí. Kroužek je na objímce uložen přechodně. Rozměrové tolerance shrnuje následující tabulka (Tabulka 1):

Tabulka 1: Rozměrové tolerance prototypu objímky

Součást	Rozměr	min/max průměr [mm]	min/max vůle/přesah [mm]
Kroužek	Ø78e7	77,940	p _{max} =0,018 v _{max} =0,058
		77,910	
Objímka	Ø78P8	77,968	v _{min} =0,010 v _{max} =0,084
		77,922	
Přípravek	Ø78N8	77,994	
		77,950	

Při kompletaci prototypu jsem nanesl lepidlo na odmaštěnou styčnou plochu kroužku a objímky, dále jsem naseparoval přípravek motorovým olejem, aby nedošlo k přilepení objímky do přípravku a celou sestavu stáhnul dohromady šroubem.

Hotový prototyp řadicí objímky po vyjmutí z přípravku můžete vidět na následujícím obrázku (Obrázek 32):



Obrázek 32: Prototyp řadicí objímky

3.2. Prototyp řadicích kamenů

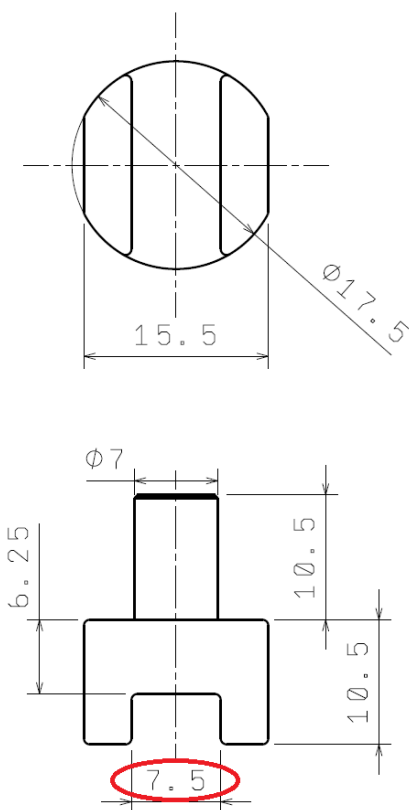
Řadicí kameny vycházejí z rozměrů původní objímky (Obrázek 27). Axiální vůle původního řešení je $v_n = 1 \text{ mm}$ (šířka drážky v objímce 7,5 mm a šířka řadicího kamene 6,5 mm). U mnou navrženého řešení jsem měl obavy z dostatečného mazání styčných ploch mezi objímkou a kamenem, protože původní design objímky umožňoval zadržování převodového oleje v drážce objímky. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl pro výrobu tří variant axiální vůle v řadicích kamenech v_n (originální 1 mm, menší 0,9 mm a větší 1,15 mm), protože jsem se domníval, že velikost této vůle bude mít dopad na kvalitu mazání

styčných ploch. Mezi třemi velikostmi drážky v řadicích kamenech se rozhodnu pro tu nejlepší na základě reálných zkoušek.

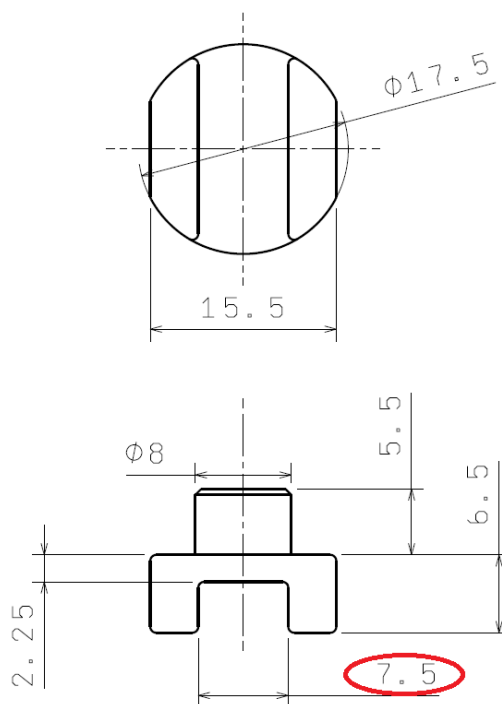
Řadicí kameny jsou původně ve vidličkách zajištěny pomocí rozlisování zadní části. U prototypů jsem se rozhodl axiální zajištění řadicích kamenů vynechat, protože se budou často měnit a z vidličky nemohou v převodovce vypadnout – pouze se tím zhorší podmínky montáže.

V případě řadicích kamenů 3. a 4. rychlostního stupně jsem se rozhodl kvůli jednoduchosti výroby prvních prototypů zůstat u dvoubodového styku.

Následující obrázky (Obrázek 33, Obrázek 34) ukazují tvar a základní rozměry řadicích kamenů. Zároveň je na nich zvýrazněna šířka drážky, která bude vyrobena ve třech variantách (viz. předchozí text).



Obrázek 33: Rozměry prototypu řadicího kamene 3./4. stupně



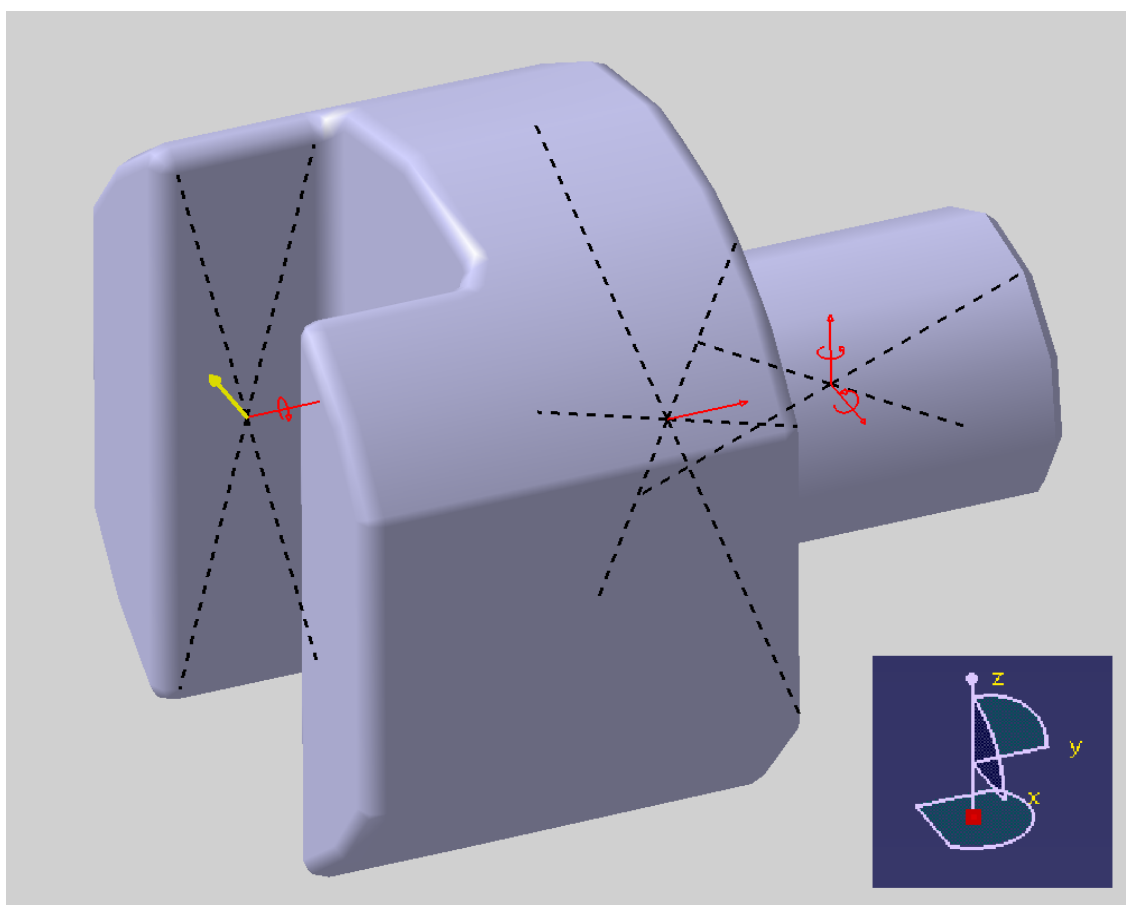
Obrázek 34: Rozměry prototypu řadicího kamene 5. stupně

Jako materiál pro výrobu prototypů jsem zvolil dobře obrobitelný cínový bronz CuSn6 v jakosti R420/H125 jehož materiálové vlastnosti shrnuje Tabulka 2.

Tabulka 2: Materiálové vlastnosti CuSn6 [12]

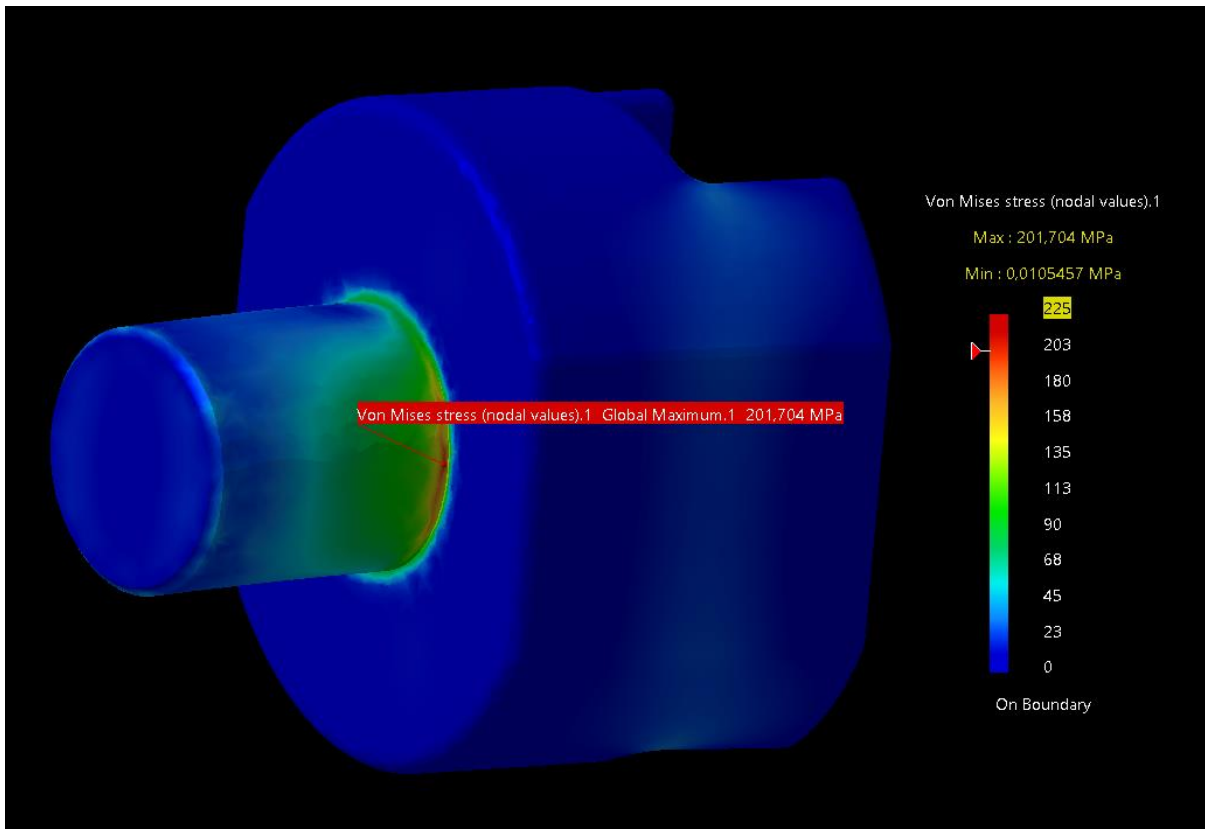
Materiál	Mez pevnosti v tahu R_m [MPa]	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Tažnost A_{50} [%]	Tvrдость HV
CuSn6 R420/H125	420 - 520	min. 260	min. 17	125 - 165

Navrhnuté řadicí kameny jsem podrobil MKP analýze v softwaru Catia V5 pro maximální zatížení objímky silou 1000 N tzn. zatížení jednoho kamene silou 500 N. Kameny jsem zavazbil pomocí virtuálních deformovatelných dílů (Smooth Virtual Part) jak je znázorněno na následujícím obrázku (Obrázek 35). V místě vložení kamene do vidličky jsem zamezil všem pohybům vyjma posuvu a rotace kolem osy „y“. Posuv v ose „y“ je zachycen stěnou kamene dosedající na vidličku a rotaci kolem osy „y“ je zamezeno v místě styku kamene s objímkou, kde zároveň působí i zatížení o velikosti 500 N v záporném směru osy „x“.

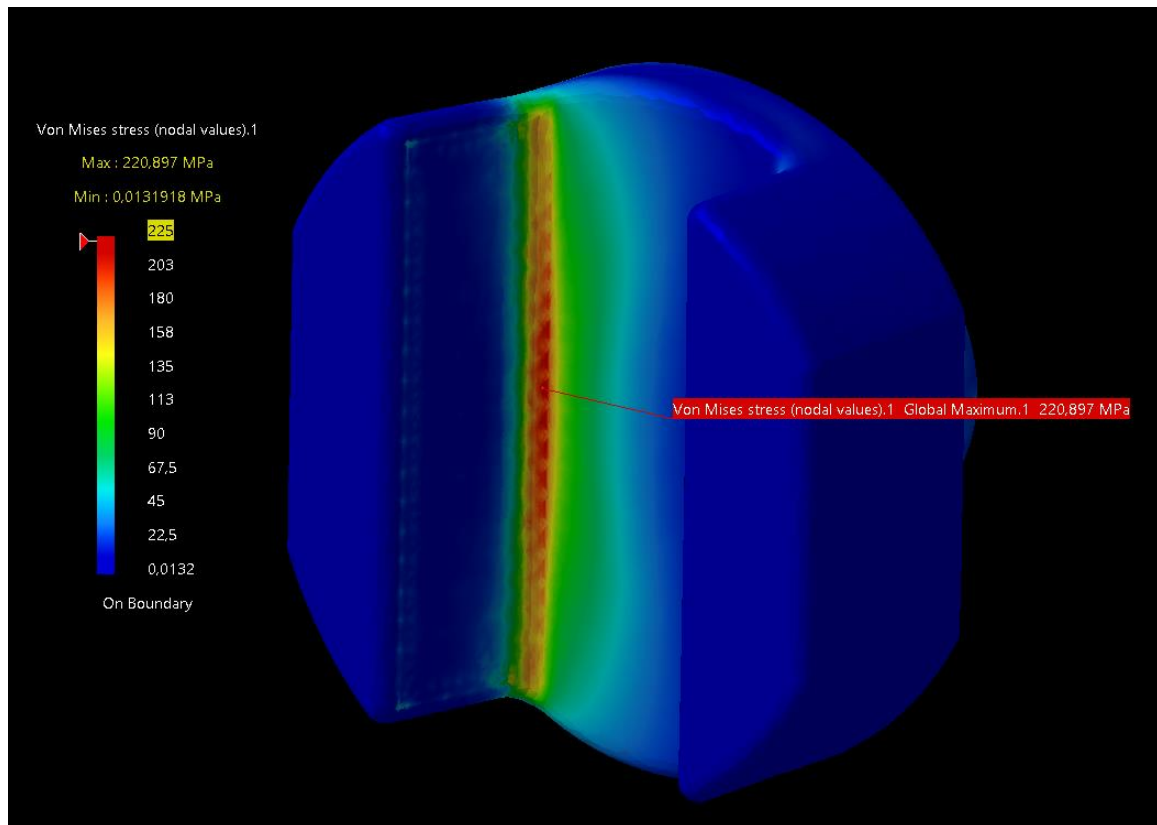


Obrázek 35: Okrajové podmínky MKP analýzy prototypů řadicích kamenů

Jak je zřejmé z následujících obrázků (Obrázek 36, Obrázek 37), i přes stejné namáhání zdánlivě podobných součástí, jsou kritická místa jiná. V případě kamene 5. rychlostního stupně je největší slabinou tenké „dno“ kamene o tloušťce pouze 2,25 mm, zatímco u kamene 3. a 4. rychlostního stupně je výrazně silnější dno (6,25mm) spíše na škodu. Sice posiluje odolnost kamene vůči vylomení jeho boku, ale zároveň způsobuje takřka třikrát vyšší ohybové namáhání v místě přechodu kamene v kulatou část vloženou do vidličky.



Obrázek 36: Kritické místo prototypu kamene 3. a 4. rychlostního stupně



Obrázek 37: Kritické místo prototypu kamene 5. rychlostního stupně

V následující tabulce uvádím vypočtené bezpečnosti vůči mezi kluzu materiálu CuSn6 (Tabulka 3).

Tabulka 3: Bezpečnosti vůči mezi kluzu navržených prototypů řadicích kamenů

Součást	Smluvní mez kluzu [MPa]	Maximální napětí dle MKP [MPa]	Bezpečnost vůči mezi kluzu [1]
Řadicí kamen 3./4. rychlostního stupně	260	202	1,3
Řadicí kamen 5. rychlostního stupně		221	1,2

Z výsledků v tabulce vyplývá, že při minimální mezi kluzu materiálu uvedené v materiálovém listu a zatížení 500 N je bezpečnost vůči trvalým deformacím součástí větší než 1. Vzhledem k tomu, že zatížení použité ve výpočtech je mnohem vyšší než běžné zatížení v provozu, dají se kameny považovat za dostatečně dimenzované.

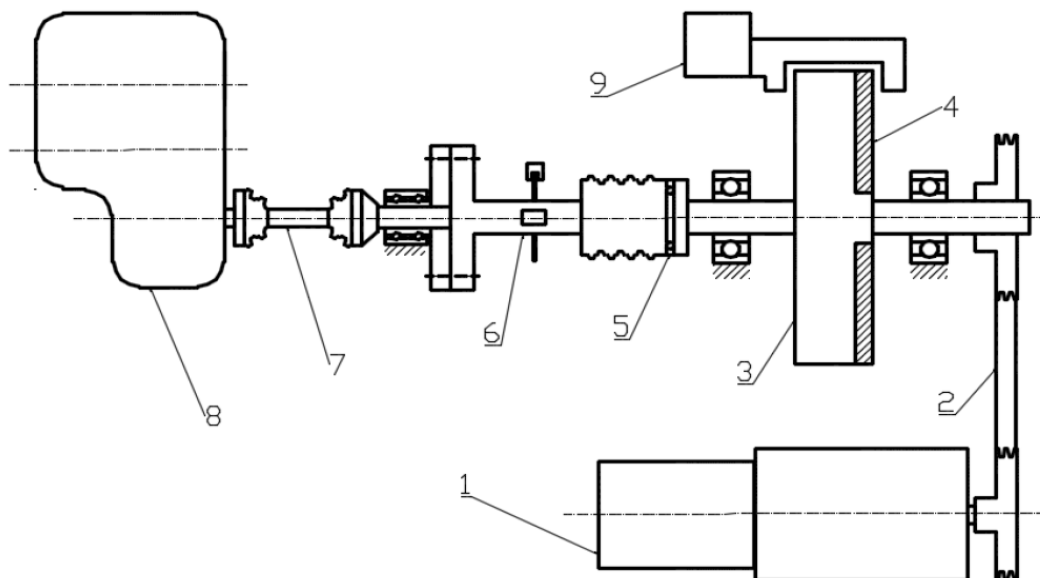
4. Testování na zkušebním stavu

Vyrobené prototypy jsem podrobil testům na zkušebním stavu v laboratořích FS ČVUT na Julisce.

4.1. Zkušební stav

Setrvačnickový zkušební stav je určen pro zkoušky funkčnosti a životnostní zkoušky mechanismů řazení. Jedná se o automatizované zařízení simulující skutečné chování systému řazení jako ve vozidle.

Základem zkušebního stavu (Obrázek 38) je setrvačnick reprezentující setrvačné hmoty jedoucího vozidla (3) poháněný přes řemenový převod (2) asynchronním elektromotorem o výkonu 18,5 kW (1). Výstup zkoušené převodovky (8) je připojen přes originální kloubový hřídel z odpovídajícího vozidla (7), hřídelí polepenou tenzometry pro měření krouticího momentu (6), a nakonec pružnou a pojistnou spojkou (5) k setrvačnicku. Na vstup do převodovky je nasazena spojková lamela, která se volně protáčí. Setrvačnick je opatřen nouzovou čelistovou brzdou (9)



Obrázek 38: Schéma zkušebního setrvačnickového stavu [13]

Z konstrukce stavu vyplývá, že dokonale simuluje stav, kdy je ve vozidle rozepnutá třecí spojka mezi převodovkou a spalovacím motorem a převodovka je hnaná od pohybu vozidla po vozovce – typický stav, kdy dochází za jízdy k přeřazení. Nicméně v průběhu

zkoušek je převodovka zatížena pouze synchronizačním momentem a ztrátami – neteče přes ni žádný výkon. [13]

Změna rychlostních stupňů je zabezpečena pneumatickým řadicím robotem. Ten je k převodovce připojen přes dva lanovody stejným způsobem jako v automobilu. Pohyb řadicí páky je simulován šesti pneumatickými válci.

Celý zkušební stav je osazen množstvím čidel a sensorů z nichž jsou data shromažďována a ukládána programem vytvořeným v prostředí NI LabView. Po každém přeražení je vytvořen jeden soubor obsahující následující veličiny s vzorkovací frekvencí 1 kHz: otáčky lamely třecí spojky, otáčky setrvačnicku, krouticí moment, ovládací síla „řadicí páky“ a její posuv. S menší vzorkovací frekvencí 10 Hz jsou zaznamenávány teploty jednotlivých komponent zkušebního stavu jako například: teplota oleje v převodovce, teploty ložisek setrvačnicku a teplota elektromotoru.

Kromě výše zmíněných hodnot je snímána další řada veličin sloužící k monitorování chodu stavu a detekci případného problému; např. otáčky elektromotoru (možný prokluz řemenu), tlak v pneumatickém okruhu, teplota ložiskových domků setrvačnicku, vibrace rámu zkušebního stavu atd. Při zjištění jakékoli nesrovnalosti je stanoviště schopno se zastavit z maximálních otáček během 1 s díky nouzové čelistové brzdě umístěné přímo na setrvačnicku. [13]

4.2. Zpřesnění měření

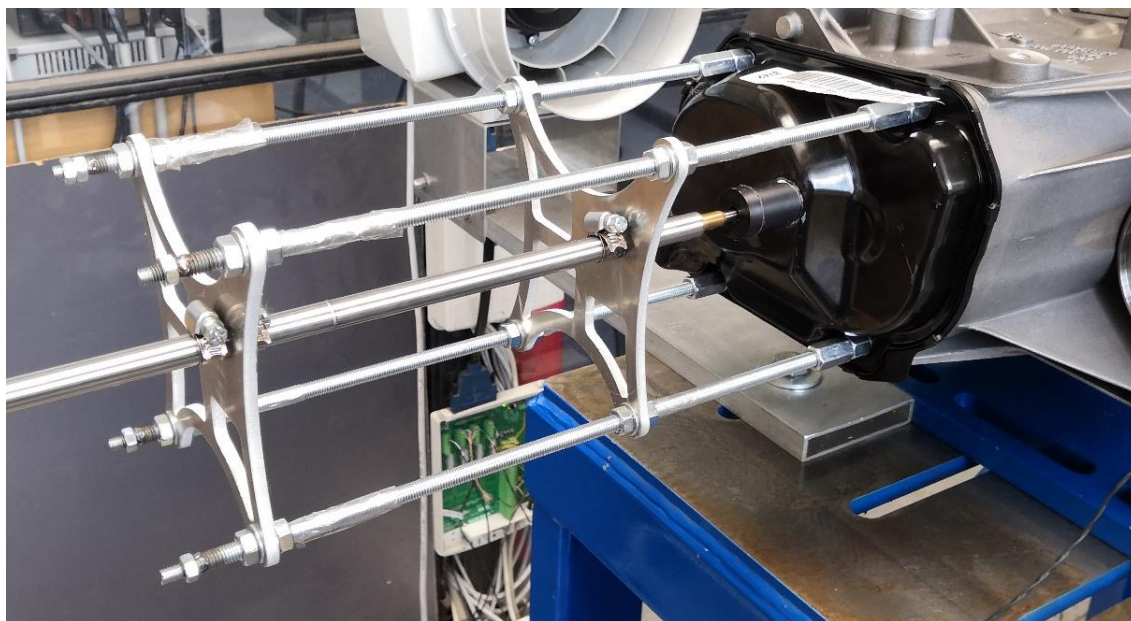
Jak bylo popsáno v předchozím odstavci, průběh řazení je vyhodnocován na základě hodnot změřených na řadicím robotovi. Tato skutečnost nám poskytuje přesnou představu o silách a posuvu na „řadicí páce“ vozidla, ale moc nevyovídá o skutečném dění uvnitř převodovky, respektive přímo na řadicím mechanismu. Řadicí robot je totiž k převodovce připojen přes přibližně 2 m dlouhé lanovody zakončené gumovými a odpruženými silentbloky, které eliminují rázy do řadicí páky a zvyšují tím komfort při jízdě. Celé vedení se tím stává pružné a naměřená data neodpovídají pohybu řadicí vidličky uvnitř převodovky.

Vzhledem k tomu, že při zkouškách mého prototypu se budu v první řadě věnovat pátému rychlostnímu stupni, který je výhodně umístěn pouze za plechovým víčkem převodovky, jsem se rozhodl přesunout sensor posuvu přímo na řadicí vidličku.

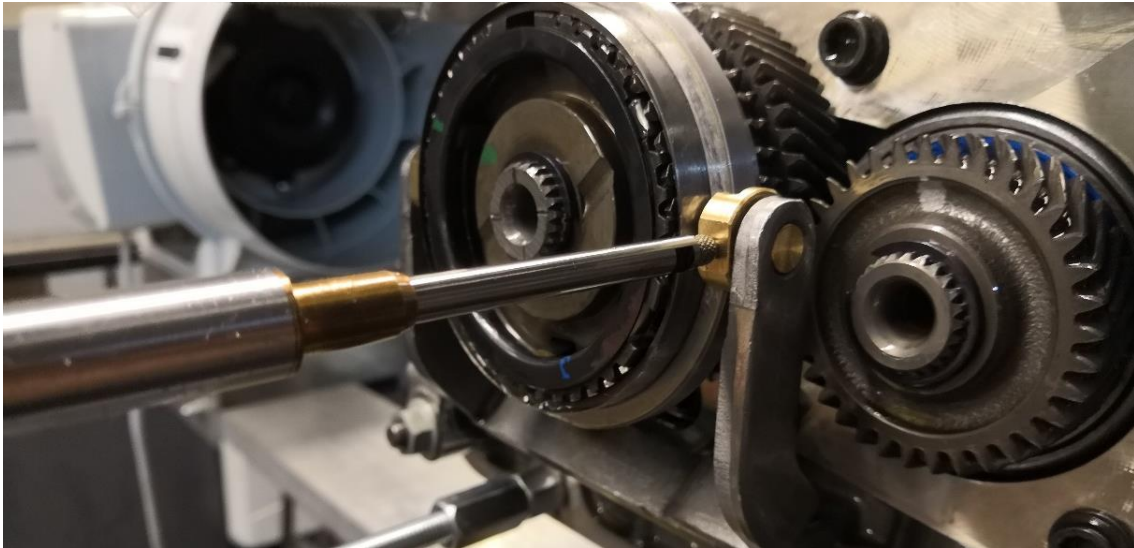
K měření jsem tedy využil stávající tyčový sensor polohy od firmy HBM, konkrétně typ HBM WA-100. Sensor je již připojený a data z něj jsou ukládána ovládacím programem, takže stačilo pouze vymyslet umístění a připevnění sensoru.

Pro připevnění sensoru kolmo na víčko převodovky jsem navrhl dva 5 mm tlusté hliníkové plechy, které se pomocí závitových tyčí připevní k dířám pro šrouby držící plechové víčko. Zároveň je v plechách vytvořena díra na místě, kterému v půdorysu odpovídá poloha prototypu řadicího kamene – bodu, kde se bude snímat posuv řadicí vidličky (Obrázek 40). Plechy byly vyříznuty vodním paprskem, takže jsem využil možnosti návrhu co nejjednoduššího řešení za cenu neobvyklého tvaru. Hmotnost celého držáku byla dost důležitý parametr, protože jsem měl obavy, zda se držák se senzorem vlivem vibrací během řazení nerozkmitají a nevnesou tím nepřesnosti do měřeného signálu.

K utěsnění kolem hrotu sensoru procházejícího skrz plechové víko jsem využil gumový O-kroužek usazený v plastovém pouzdru přilepeném na víko pomocí dvousložkového lepidla (Obrázek 39).



Obrázek 39: Nové umístění sensoru polohy



Obrázek 40: Měřící hrot sensoru polohy

4.3. Zkoušky

Při měření jsem se nejdříve zaměřil na pátý rychlostní stupeň, protože je zakrytý pouze plechovým víčkem, které se dá snadno demontovat a provádět změny na synchronizační spojce a řadicí vidličce. Naproti tomu synchronizační spojka třetího a čtvrtého rychlostního stupně už vyžaduje rozebrání převodovky, a dokonce stáhnutí nalisovaných ozubených kol z hřídele. Na třetí a čtvrtý rychlostní stupeň tedy umístím až vybraný řadicí kamen na základě zkoušek V. rychlostního stupně.

Postup jsem zvolil následující: Nejdříve jsem provedl 60 zařazení pomocí kamenů se třemi navrhnutými vůlemi. Na základě těchto dat jsem vybral nejvhodnější variantu. Vybrané řešení jsem podrobil delší zkoušce pro ověření dlouhodobé funkčnosti. Stejnou variantu jsem dále aplikoval na třetí a čtvrtý stupeň a provedl životnostní zkoušku.

4.3.1. Jízdní cykly

Všechny zkoušky byly prováděny při podmínkách jízdního cyklu pro zkoušky životnosti firmy Škoda Auto. Tento jízdní cyklus simuluje zatížení v reálném provozu. Kromě počtů přeřazení a definovaných otáček setrvačnicku je v tomto cyklu požadavek na konstantní řadicí sílu o velikosti cca 200 N. Celkové počty řazení v životnostním testu shrnuje následující tabulka (Tabulka 4), která vychází z v minulosti absolvovaných životnostních zkoušek v laboratořích na Julisce:

Tabulka 4: Životnostní zkouška firmy Škoda Auto

Rychlostní stupeň	Počet zařazení rychlostního stupně (tisíce)	Řadicí kamen	Počet zařazení řadicího kamene (tisíce)
I.	30	I./II.	160
II.	130		
III.	180	III./IV.	340
IV.	160		
V.	80	V.	80

Při zkouškách pátého rychlostního stupně se setrvačnick zkušební stavu otáčí rychlostí 951 ot/min. Při zkouškách třetího a čtvrtého rychlostního stupně se setrvačnick otáčí rychlostí 667 ot/min.

Konkrétní počty zařazení při jednotlivých zkouškách popisují v dalších kapitolách.

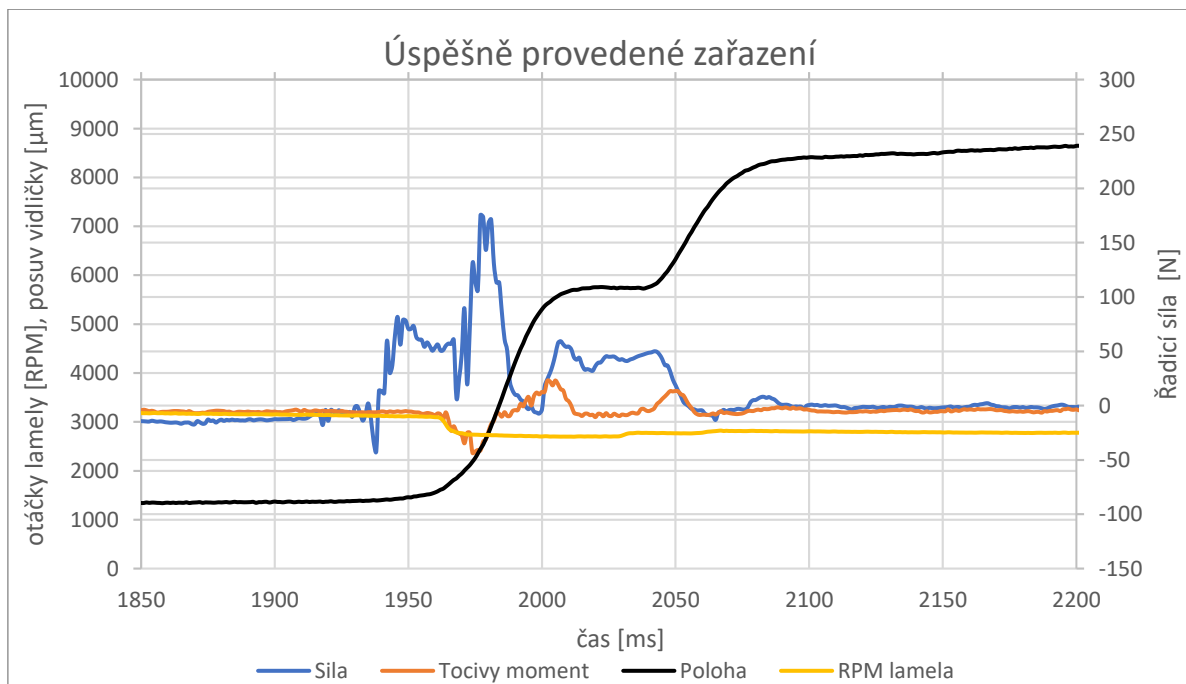
4.3.2. Výběr vůle mezi řadicím kamenem a objímkou

Provedl jsem 60 zařazení při oleji o teplotě 50°C pro každou variantu axiální vůle. Data z této zkoušky jsem vyhodnocoval pouze na základě úspěšnosti řazení. Nezkoumal jsem časy synchronizace, protože v mé práci nedošlo k žádným změnám na synchronizační spojce.

Zkušební stav je schopen detekovat nedokonalé zařazení na základě posuvu pneumatického pístu na řadicím robotovi. Já jsem využil sensoru polohy přímo na vidličce a vyhodnocoval maximum posuvu během jednotlivých řazení. Maximální možný posuv řadicí objímky vůči tělu synchronizační spojky je okolo 9,5 mm. Během řazení ale dojde k posuvu o této hodnotě velmi zřídka. Je to způsobeno tím, že na zkušebním stavu je převodovkou po synchronizaci (při posuvu objímky = Obrázek 5 - fáze 4) a 5)) přenášen pouze krouticí moment odpovídající ztrátám v převodovce. Nedojde tedy k zatížení převodovky jako ve skutečném automobilu, které by vlivem tvaru ozubení způsobilo „vtáhnutí“ řadicího ozubení do sebe tzv. „nadoraz“ a dokončení posuvu objímky. Z tohoto důvodu jsem uvažoval minimální hodnotu posuvu dostačující k úspěšnému zařazení 6,3mm. Toto číslo vychází z faktu, že při hodnotě posuvu 6 mm se dostávají řadicí ozubení za vrchol zešikmených zubů – při zatížení krouticím momentem by tedy došlo k dokončení řazení.

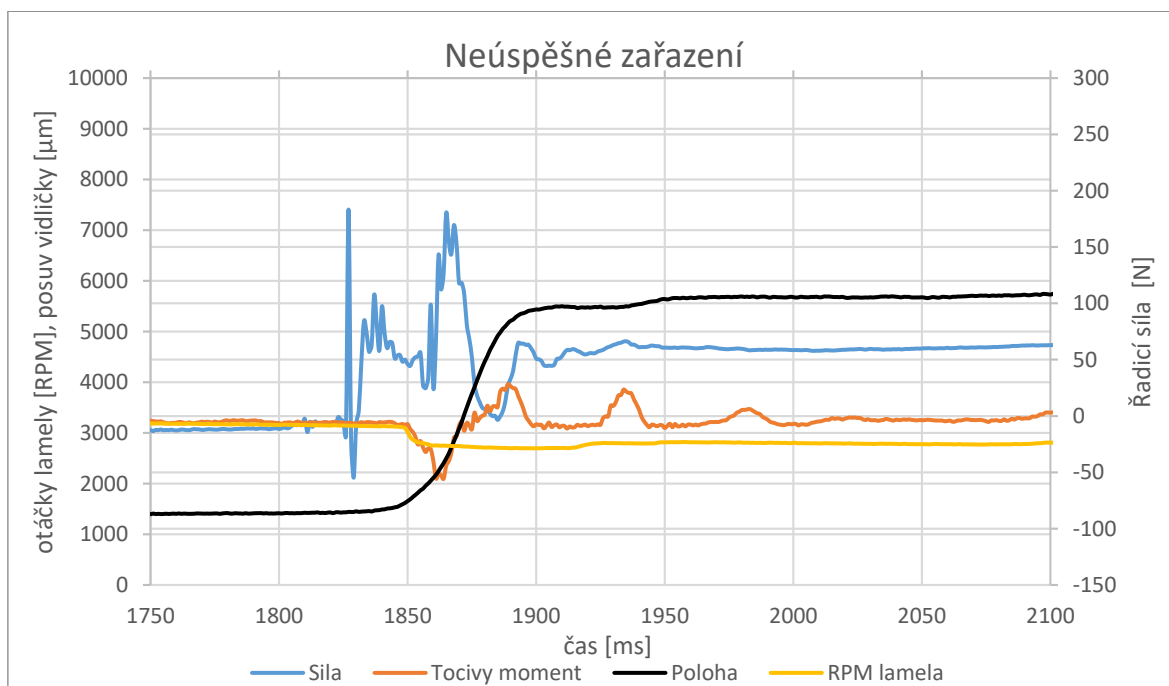
Pro představu uvádím dva grafy, první s úspěšným zařazením (Obrázek 41) a druhý s neúspěšným (Obrázek 42).

V prvním grafu si můžete všimnout dvojitého posuvu objímky vlivem naražení zubů objímky na zuby ozubeného kola, kdy dojde k zastavení posuvu. Následně se ozubené kolo pootočí, aby umožnilo zapadnutí zubů do sebe a dojde k dořazení. Maximální hodnota posuvu objímky je v tomto případě cca 8,75 mm – úspěšně provedené zařazení.



Obrázek 41: Graf úspěšného řazení

V druhém grafu je na první pohled zřejmé, že posuv objímky je výrazně menší než v prvním případě. Posuv zde dosahuje maximální hodnoty přibližně 5,75 mm. Dále je zde možné si všimnout, že řadicí síla po dokončení pohybu objímky zůstává na hodnotě cca 60 N, protože se řadicí robot snaží dokončit neúspěšné zařazení.



Obrázek 42: Graf neúspěšného řazení

Vzhledem k tomu, že takto malé posuvy není schopen řadicí robot pomocí sensorů v pneumatických válcích rozeznat (deformace lanovodů, atd.), došel jsem tímto způsobem díky přídavnému sensoru k mnohem přesnějším údajům a tím pádem i odlišným počtům nedokonalých zařazení (Tabulka 5 a Tabulka 6).

Tabulka 5: Úspěšnost zařazení 5. rychlostní stupeň dle vyhodnocení průběhu řazení

Šířka drážky v kamenu	Počet neúspěšných zařazení	Úspěšnost zařazení	Průměrná řadicí síla u úspěšných zařazení [N]
7,4mm	1	98 %	200,95
7,5mm	2	95 %	187,41
7,65mm	11	82 %	181,46

Tabulka 6: Úspěšnost zařazení 5. rychlostní stupeň dle řadicího robota

Šířka drážky v kamenu	Počet neúspěšných zařazení	Úspěšnost zařazení	Průměrná řadicí síla u úspěšných zařazení [N]
7,4mm	0	100 %	-
7,5mm	0	100 %	-
7,65mm	3	95 %	-

Z výše uvedených výsledků je patrné, že největší spolehlivosti při řazení dosáhly řadicí kameny s šířkou drážky 7,4mm (vůle mezi kamenem a objímkou 0,9mm).

4.3.3. Dlouhodobé zkoušky funkčnosti a životnosti

Na základě předchozích výsledků jsem podrobil řadicí kameny o šířce drážky 7,4 mm dlouhodobé zkoušce za účelem ověření funkčnosti na 5. rychlostním stupni a životnostní zkoušce na 3. a 4. stupni.

4.3.3.1. Synchronizační spojka 5. rychlostního stupně

U pátého rychlostního stupně jsem provedl 2010 zařazení. Jízdní cyklus se skládal ze 134 sekvencí o 15 přeřazeních. Vzhledem k tomu, že se v reálném provozu neřadí tak velké množství po sobě jdoucích řazení na stejných stupních, musel jsem na konci každé sekvence přidat 60 sekund, kdy nedocházelo k řazení a pouze se chladily synchronizační spojky. Tento fakt dělá zkoušky o vysokém počtu přeřazení velmi časově náročné.

Během testů řadicí robot nezaznamenal ani jedno špatné řazení. Z následné analýzy dat (provedené stejným způsobem jako v kap. 4.3.2) jsem zjistil, že k chybným zařazením došlo. Nicméně jednalo se pouze o 19 zařazení z celkového počtu 2010, což odpovídá úspěšnosti řazení 99,2 %. Po dokončení zkoušky jsem provedl vizuální kontrolu řadicích kamenů. Žádné viditelné poškození ani úbytek materiálu jsem nepozoroval, pouze je možné si všimnout vyleštění styčných ploch na bocích kamenů (Obrázek 43).

Ačkoli zkouška obsahovala pouze 2010 přeřazení, což není dostatečný počet pro ověření životnosti, lze z výsledků usoudit, že je řadicí mechanismus v této podobě funkční.



Obrázek 43: Řadicí kamen 5. rychlostního stupně po 2010 přeřazeních

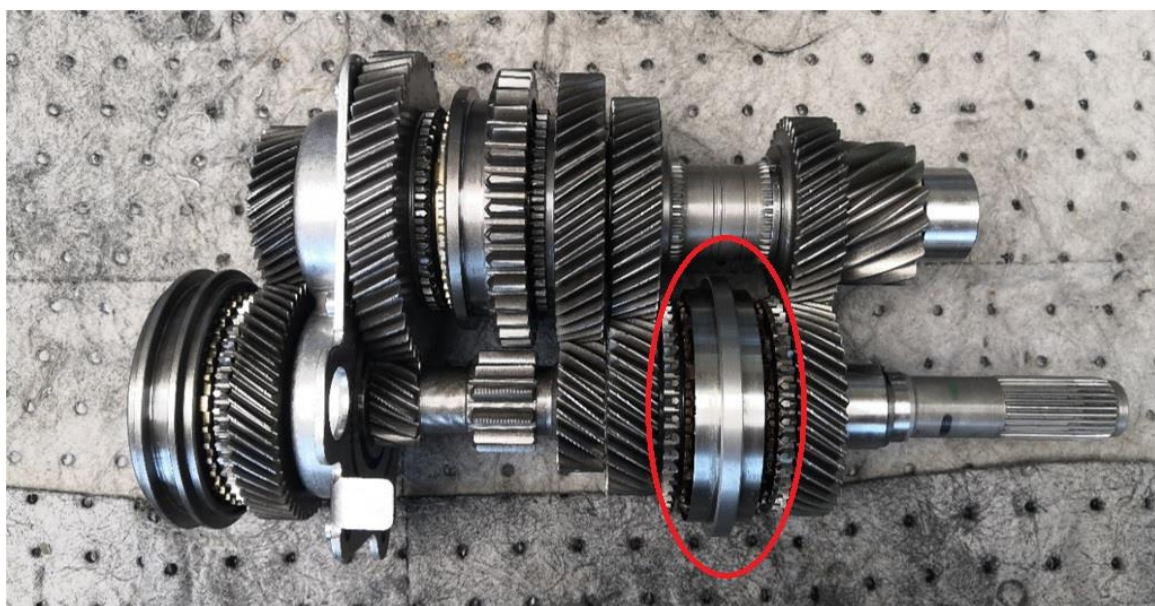
4.3.3.2. Synchronizační spojka 3. a 4. rychlostního stupně

V případě třetího a čtvrtého rychlostního stupně jsem se zaměřil na ověření životnosti. Pro vyhodnocení zkoušky jsem změřil tloušťky boků kamenů před namontováním do převodovky pro určení úbytku materiálu po testech (Obrázek 44).

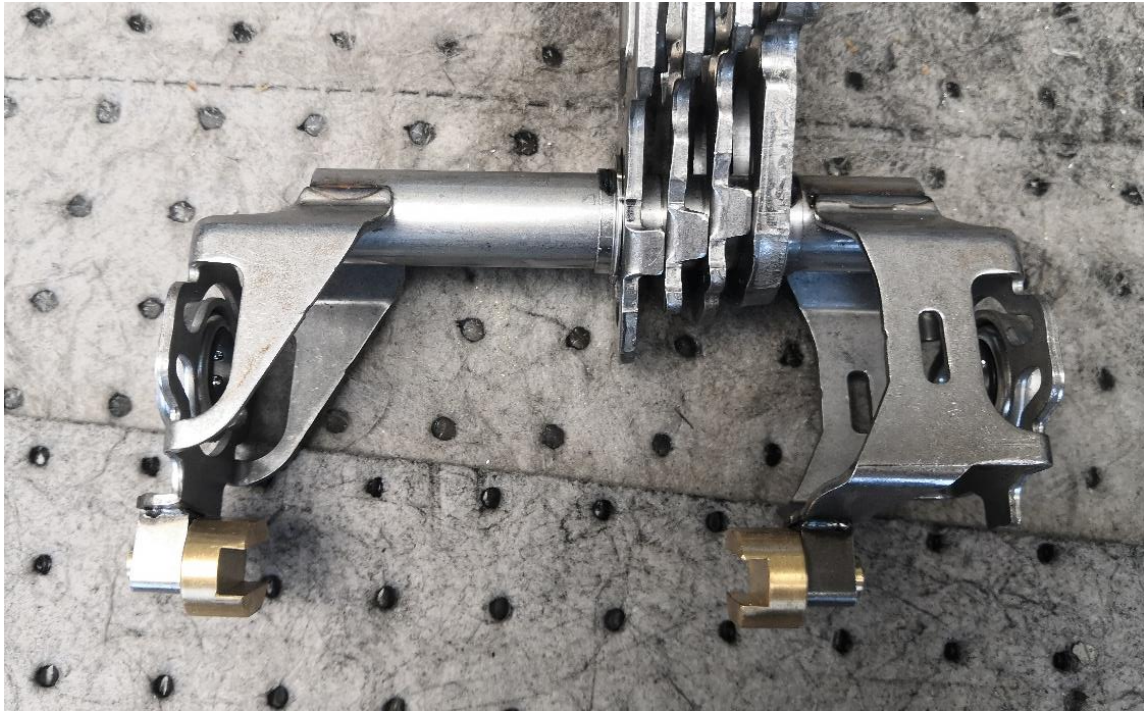


Obrázek 44: Měření tloušťky boků řadicích kamenů 3. a 4. rychlostního stupně

Pro použití prototypové objímky na synchronizační spojce 3./4. rychlostního stupně bylo nutné převodovku kompletně rozebrat, vylisovat hřídele z ložiskové jednotky a stáhnout ozubené kolo čtvrtého převodového stupně ze vstupní hřídele. Sestavu obou hřídelů se zkoušenou objímkou a řadicí mechanismus s kameny 3. a 4. rychlostního stupně můžete vidět na dalších obrázcích (Obrázek 45 a Obrázek 46).



Obrázek 45: Sestava hřídelů převodovky s prototypem objímky



Obrázek 46: Prototypy řadicích kamenů 3. a 4. rychlostního stupně ve vidličce

Řadicí kamen 3. a 4. rychlostního stupně je v převodovce zatěžován šesti možnými způsoby (řazení 2→3, 3→2, 3→4, 4→3, 4→5, 5→4). Z hlediska zatížení řadicího kamene, respektive synchronizační spojky jsou nejvíce náročná podřazování tj. 4→3 a 5→4.

Vzhledem k časové náročnosti životnostního cyklu fy. Škoda Auto jsem se rozhodl alespoň přiblížit 25% z něj tj. 85 000 zařazení pomocí kamenu 3. a 4. rychlostního stupně. Tato hodnota vychází z předchozích životnostních zkoušek realizovaných v laboratořích FS ČVUT, kdy se převodovka po každých 25% životnostní zkoušky odstavila, rozebrala a provedla se vizuální a metrologická kontrola.

Za účelem snížení času životnostní zkoušky na minimum jsem se rozhodl zaměřit na nejvíce náročná řazení, tzn. řadit dva typy cyklů: 3→4 + 4→3 a 4→5 + 5→4. Zkušební stav je při těchto cyklech schopen pracovat v taktu průměrně cca 7 zařazení za minutu, protože není možné dlouhodobě řadit bezprostředně za sebou, aby nedošlo k přehřátí synchronizační spojky a poškození převodovky, proto je nutné mezi řazení vkládat pauzy.

Následující tabulka obsahuje srovnání životnostního cyklu firmy Škoda Auto a mnou provedených řazení v rámci životnostního testu této diplomové práce (Tabulka 7).

Tabulka 7: Srovnání životnostních testů se zkušebním cyklem Škoda Auto

Řazení	2→3	3→2	3→4	4→3	4→5	5→4
Počet opakování v životnostní zkoušce Škoda Auto [tisíce]	100	100	80	80	80	80
Počet opakování absolvovaných v rámci životnostní zkoušky v diplomové práci [tisíce]	0	0	20	20	20	20
Zařazení / vyřazení	↑ zařazení	vyřazení	↑ zařazení	↓ zařazení	vyřazení	↓ zařazení

V tabulce jsou znázorněny počty řazení a vyznačeno také, zda se jedná o zařazení pomocí testované vidličky, případně pouze vyřazení a také, zda je zařazeno směrem nahoru, nebo podřazováno. Dále jsou zde tučně zvýrazněná dvě nejnáročnější řazení, která vnesou největší namáhání a opotřebení do zkoušených kamenů.

Z tabulky je vidět, že se z časových důvodů nepodařilo odjet celých 25% z životnostního cyklu Škoda Auto, protože se nepovedla řazení na druhý převodový stupeň a zpět. Při zkouškách jsem dal přednost provedení co nejvíce řazení mezi 3. a 4. rychlostním stupněm a 4. a 5. rychlostním stupněm, a to z důvodu, že tato řazení jsou více náročná na řadicí kameny.

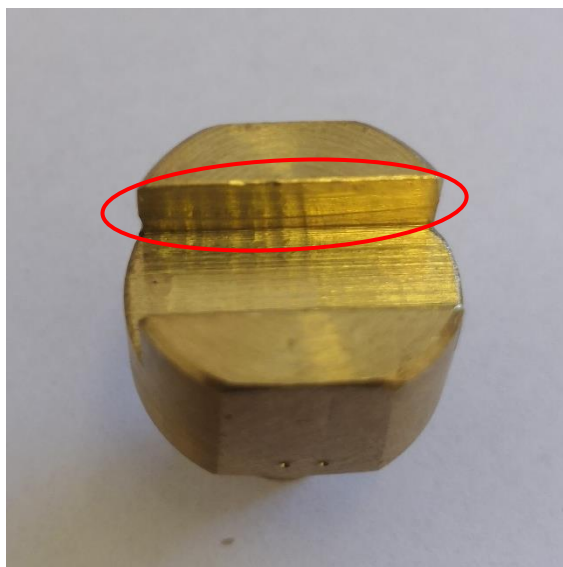
Při řazení mezi 2. a 3. rychlostním stupněm dochází ze strany vidličky 3. a 4. rychlostního stupně pouze k vyřazování do neutrálu a řazení 3. rychlostního stupně při řazení nahoru, kdy je potřeba malý synchronizační moment ve srovnání s podřazováním.

Během všech provedených 80 000 přeřazení, která trvala čistého času cca 190 hodin, nedošlo dle řadicího robota k žádnému nedokonalému přeřazení.

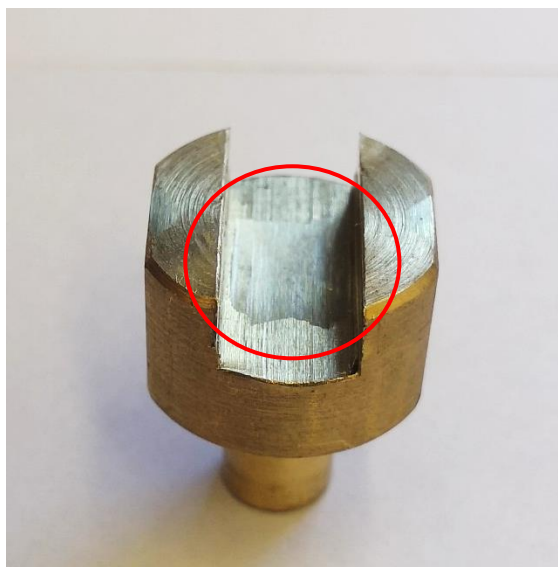
Po dokončení jsem provedl rozborku převodovky, vizuální kontrolu řadicích kamenů a proměření úbytku materiálu ze styčných ploch řadicích kamenů. Kvůli výrazně rozdílné tvrdosti kroužku objímky, který je vyroben z oceli, a řadicích kamenů z bronzu jsem předpokládal, že úbytek na kroužku objímky nenastane, nebo bude vůči opotřebení řadicích kamenů zanedbatelný, tudíž jsem ho nezaznamenával. Naměřené hodnoty a úbytky ukazuje následující tabulka (Tabulka 8), za kterou následují obrázky kamenů a řadicí objímky (Obrázek 47, Obrázek 48 a Obrázek 49).

Tabulka 8: Úbytek materiálu na bocích řadicích kamenů

	Řadicí kamen č.1		Řadicí kamen č.2	
	Tloušťka bok 1 [mm]	Tloušťka bok 2 [mm]	Tloušťka bok 1 [mm]	Tloušťka bok 2 [mm]
0 zařazení	4,08	4,09	4,10	4,07
80 000 zařazení	4,06	4,06	4,07	4,06
Úbytek	0,02	0,03	0,03	0,01



Obrázek 47: Řadicí kamen 3. a 4. rychlostního stupně č. 1 po 80 000 zařazeních



Obrázek 48: Řadicí kamen 3. a 4. rychlostního stupně č. 2 po 80 000 zařazeních



Obrázek 49: Řadicí objímka po 80 000 zařazeních

Z naměřených dat a fotografií je zřejmé, že došlo pouze k mírnému opotřebení styčných ploch řadicích kamenů v rádech setin milimetru. Takové opotřebení by se dalo považovat spíše za vyrovnání nerovností po předchozím třískovém obrábění a vyleštění povrchu. Na dně jednoho z řadicích kamenů je výrazné opotřebení kamenu od řadicí objímky, které je způsobeno absencí axiálního zajištění řadicího kamenu ve vidličce. Tento řadicí kamen byl během celého testování nad objímkou (celý řadicí mechanismus je v převodovce otočen na bok o 90°) a vlivem gravitace se vysunul z vidličky a dostal se do trvalého kontaktu s objímkou. K tomuto poškození by pochopitelně v produkční převodovce nedošlo, protože by byl řadicí kamen ve vidličce axiálně zajištěn.

Na fotografii řadicí objímky je viditelné pouze vyleštění styčné plochy. K žádnému opotřebení nebo poškození dle očekávání nedošlo.

4.4. Závěr ze zkoušek prototypů

Zkoušky na 5. rychlostním stupni potvrdily funkčnost mnou navržených prototypů a vyloučily závažné problémy (zadírání, výrazný úbytek materiálu kamenů, atd.).

Životnostní zkouška na 3. a 4. rychlostním stupni ukázala, že mnou navržené prototypy řadicích kamenů jsou schopny fungování i v dlouhodobém použití bez opotřebení, které by mělo vliv na funkčnost mechanismu. Zároveň se ukázalo, že dvoubodový styk řadicích kamenů místo originálního tříbodového se zdá být dostačující, protože nedocházelo k žádným problémům vlivem křížení řadicích kamenů.

Pro finální verdikt by ale bylo nezbytné provést kompletní životnostní zkoušku celé převodovky s prototypovými kameny a objímkami. Nicméně vzhledem k časové náročnosti těchto zkoušek bude test životnosti dokončen nad rámec mé diplomové práce.

5. Návrh řadicí vidličky

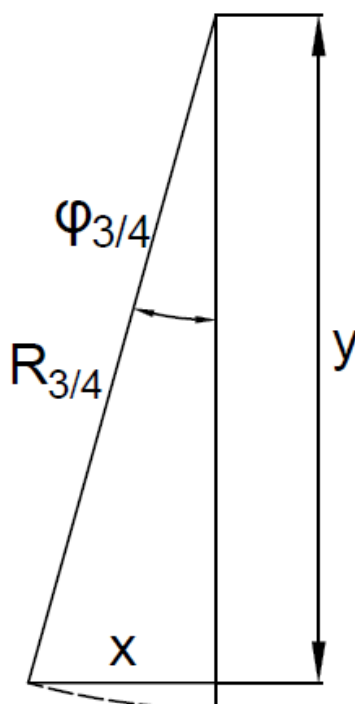
Po dokončených testech na zkušebním stanovišti a potvrzení funkčnosti celého řazení s inverzním tvarem objímky a kamenů jsem se pustil do návrhu řadicí vidličky 5. stupně a sestavy řadicích kamenů 3. a 4. rychlostního stupně.

Vycházel jsem z dříve navržených a odzkoušených prototypů a z nejnovější verze řadicího mechanismu využívajícího plastové řadicí kameny a zaoblené neotočné kameny pro 5. rychlostní stupeň (viz. kapitolu 2.3.3.2). Zároveň jsem se snažil o úpravu minima součástí, aby se mohlo použít co nejvíce stávajících dílů a zjednodušila se případná implementace nového řešení do sériové výroby.

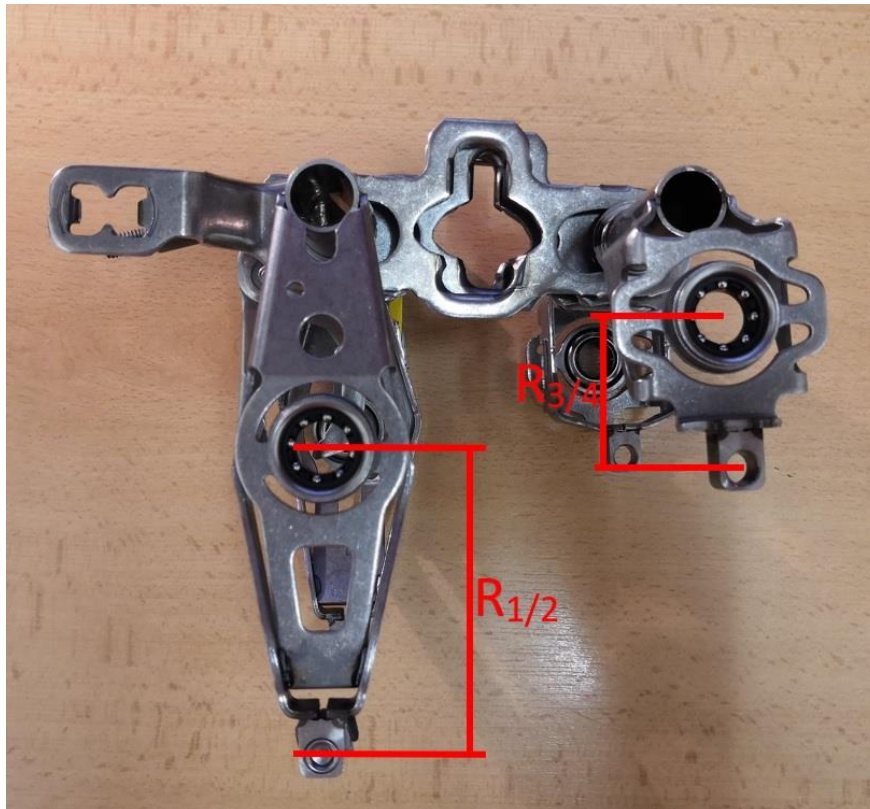
5.1. Řadicí kameny 3. a 4. rychlostního stupně

Před samotným návrhem kamenů do vidličky 3. a 4. rychlostního stupně jsem se zaměřil na analýzu pohybu vidličky ve srovnání s ostatními, a to hlavně z hlediska nutnosti třibodového styku kamenů s objímkou.

Následující schéma ukazuje kinematiku pohybu při řazení (Obrázek 50).



Obrázek 50: Schéma pohybu řadicích kamenů 3. a 4. rychlostního stupně při řazení



Obrázek 51: Poloměry otáčení kamenů ve vidličkách

Z obrázku je patrné, že úhel natočení vidličky $\varphi_{3/4}$ se vypočte pomocí goniometrické funkce sinus z maximálního posuvu řadicí objímky x a poloměru trajektorie pohybu kamene $R_{3/4}$:

$$\varphi_{3/4} = \sin^{-1} \frac{x}{R_{3/4}} = \sin^{-1} \frac{9,5}{33,8} = 16,32^\circ \quad (3)$$

Dále pomocí Pythagorovy věty zjistím vertikální polohu středu kamene po zařazení y .

$$y = \sqrt{R_{3/4}^2 - x^2} = \sqrt{33,8^2 - 9,5^2} = 32,44 \text{ mm} \quad (4)$$

Výsledky totožných výpočtů pro ostatní řadicí vidličky uvádím přehledně níže v tabulce (Tabulka 9). Můžete si zde všimnout i rozdílu ve vertikálním posuvu bodu dotyku vůči ose rotace ($R_i - y_i$) mezi vidličkou 3. a 4. rychlostního stupně a zbylými vidličkami.

Tabulka 9: Rozbor natočení posuvů kamenů při řazení

Řadicí vidlička	1/2	3/4	5
R_i [mm]	67,8	33,8	71,1
x_i [mm]	9,5	9,5	9,5
y_i [mm]	67,13	32,44	70,46
$R_i - y_i$ [mm]	0,67	1,36	0,64
φ_i [°]	8,05	16,32	7,68

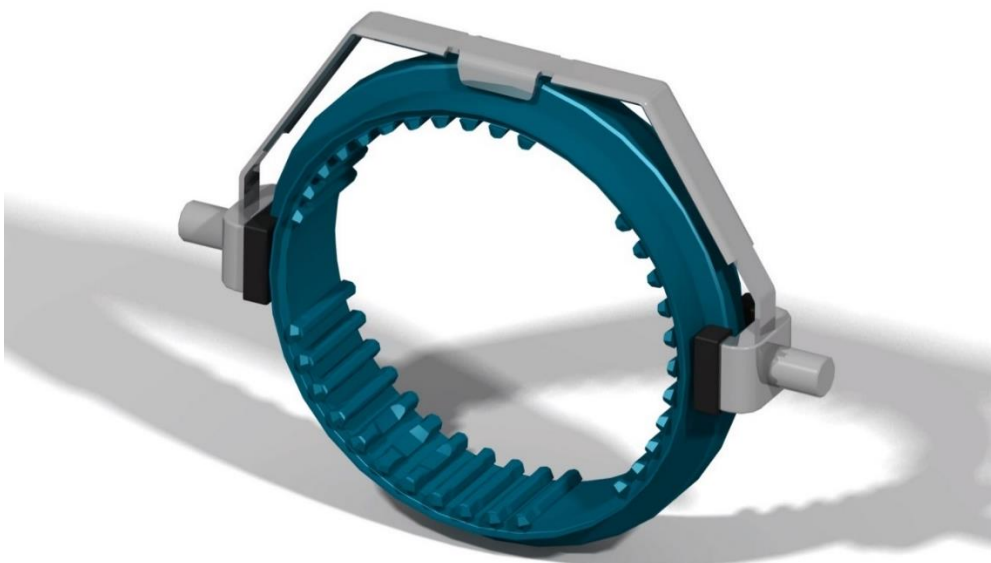
Vzhledem k výsledkům výpočtů a více než dvojnásobnému natočení kamenů u vidličky 3. a 4. rychlostního stupně jsem se rozhodl pro návrh řadicích kamenů s půlměsícem pro třetí bod dotyku.

Navržená konstrukce je částečně odlišná od prototypů. Hlavním rozdílem je výše zmíněný půlměsíc a použitý materiál – svařitelná ocel S235JR. Změna materiálu kamenů vyžaduje buď použití kluzné vrstvy, jako například nanesený kluzný povlak z bronzu (2.3.3.1), nebo plastové návleky jako v současné sériové verzi. Rozhodl jsem se pro plastové návleky z důvodu co největší kompatibility nového řešení se současným, jak zmiňuji na začátku kapitoly 5.

Půlměsíc je navržen z 1 mm tlustého ocelového plechu, který je po krajích ohnut pro zvýšení prostorové tuhosti jako je tomu u originálu. Tříbodový styk kamenů s objímkou zabezpečuje stejné natočení kamenů vůči objímce a zamezuje tím křížení, ke kterému by mohlo dojít během řazení.

Následující obrázky znázorňují CAD model navržených řadicích kamenů 3. a 4. rychlostního stupně (Obrázek 52, Obrázek 53).

Kompletní výrobní dokumentace k navrženým řadicím kamenům 3. a 4. rychlostního stupně je součástí příloh této závěrečné práce.



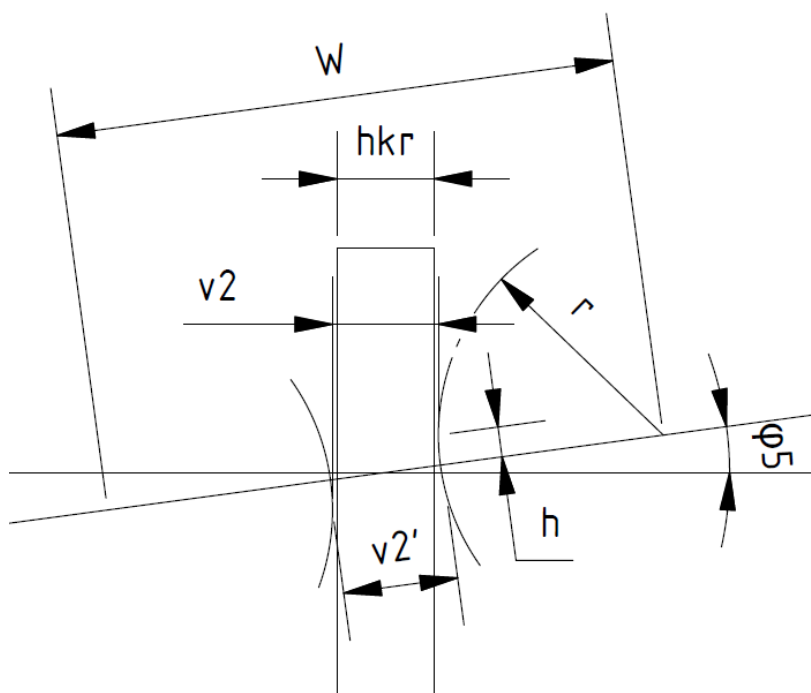
Obrázek 52: Sestava CAD modelu navržených řadicích kamenů 3. a 4. rychlostního stupně s řadící objímkou



Obrázek 53: CAD model navržených řadicích kamenů 3. a 4. rychlostního stupně

5.2. Řadicí vidlička 5. rychlostního stupně

Pro konečný návrh vidličky 5. rychlostního stupně jsem se inspiroval současným řešením v podobě vidličky se zaoblenými plastovými kameny (2.3.3.2). Využití tohoto principu bude v případě objímky vyráběné práškovou metalurgií vyžadovat čtyři řadicí kameny místo původních dvou. Pro správný návrh poloměrů zakřivení a vhodné vůle jsem vyšetřil pohyb kamenů během řazení. Následující obrázek znázorňuje situaci při zařazeném pátém rychlostním stupni (Obrázek 54).

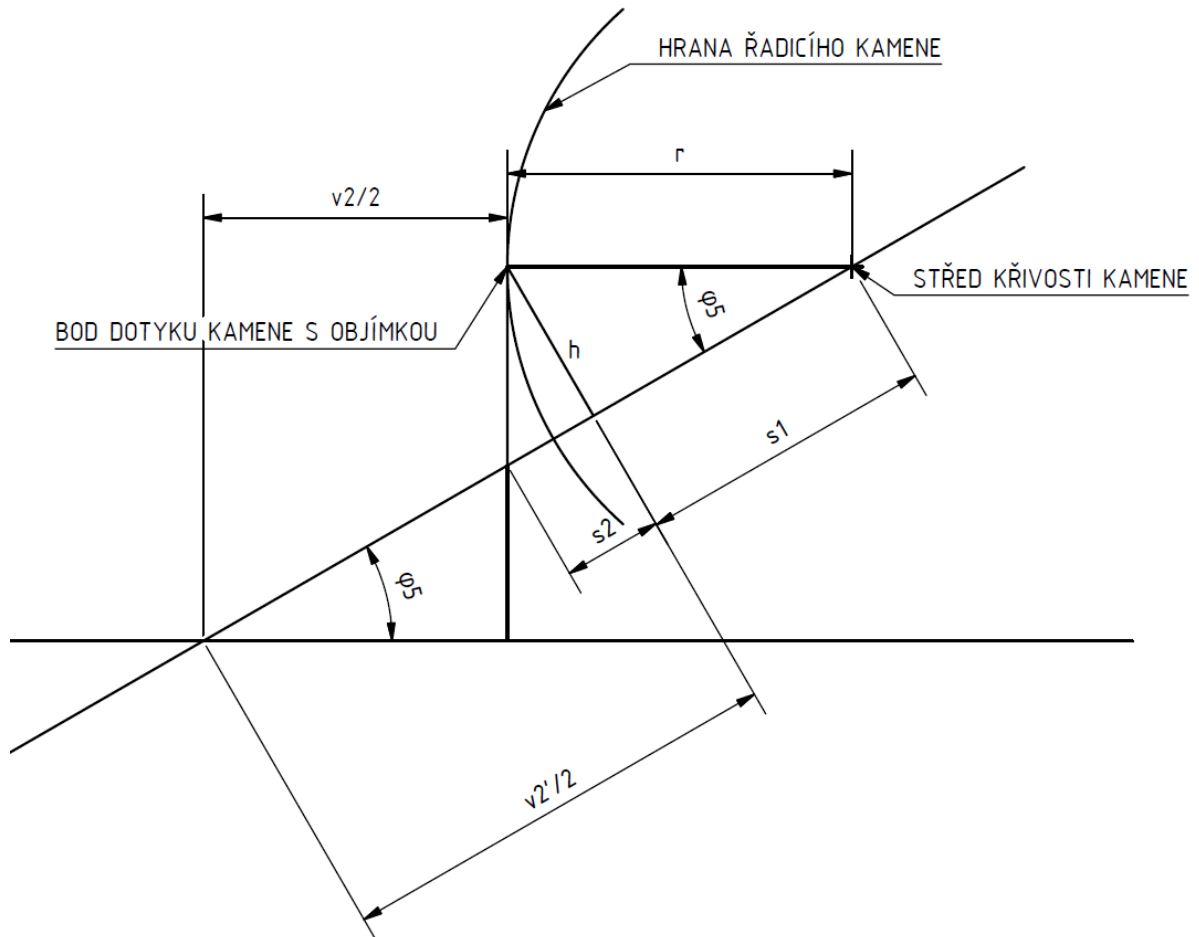


Obrázek 54: Schéma natočené vidličky 5. rychlostního stupně

Ze schématu je patrné, že kritickými parametry pro funkčnost vidličky budou horizontální vzdálenost kamenů po zařazení v_2 a vzdálenost bodu dotyku s objímkou od spojnice středů křivosti kamenů h . V případě malé vzdálenosti v_2 , nebo dokonce menší, než je šířka kroužku h_{kr} , by docházelo k trvalému kontaktu kamenů s objímkou – vzpříčení objímky mezi kameny. Velká vzdálenost h by znamenala riziko křížení objímky při řazení a vyřazování.

Pro analýzu výše zmíněných kritických parametrů jsem vyjádřil jejich vzájemné závislosti. Pro další výpočty uvádím detailnější schéma, které pro lepší názornost a

přehlednost, na rozdíl od předchozího, nezobrazuje situaci ve skutečném měřítku (Obrázek 55).



Obrázek 55: Detailní schéma natočené vidličky 5. rychlostního stupně

Z pravoúhlého trojúhelníku s vrcholem ve středu křivosti kamene vyplývá vztah pro vzdálenost bodu dotyku od spojnice středů zaoblení kamenů h .

$$h = r \cdot \sin \varphi_5 \quad (5)$$

Ze stejného trojúhelníku také dostávám délku druhé odvěsny s_1 , ze které následně jednoduše vypočtu polovinu velikosti podélné vzdálenosti bodů dotyku kamenů s objímkou $\frac{v_2}{2}$.

$$s_1 = r \cdot \cos \varphi_5 \quad (6)$$

$$\frac{v_2'}{2} = \frac{W}{2} - s_1 = \frac{W}{2} - r \cdot \cos \varphi_5 \quad (7)$$

Z nejmenšího pravouhlého trojúhelníku dostávám rozměr s_2 .

$$s_2 = h \cdot \tan \varphi \quad (8)$$

A nakonec z trojúhelníku s vrcholem ve středu klopení kamenů dostávám výslednou horizontální, a tím pádem minimální, vzdálenost mezi řadicími kameny v_2 .

$$v_2 = 2 \cdot \left(\frac{v_2'}{2} - s_1 \right) \cos \varphi_5 = 2 \cdot \left(\frac{W}{2} - r \cdot \cos \varphi_5 - h \cdot \tan \varphi_5 \right) \cos \varphi_5 \quad (9)$$

Z první rovnice (Rovnice 5) je jasně vidět, že vzdálenost bodu dotyku od spojnice zakřivení řadicích kamenů je závislá na úhlu natočení řadicí vidličky a poloměru zakřivení řadicích kamenů.

Z poslední rovnice (Rovnice 9) je patrné, že horizontální vzdálenost mezi kameny je závislá na vzdálenosti středů křivosti, což je ale funkce požadované vůle v neutrálu a poloměrů zakřivení, dále úhlu natočení vidličky a samotném poloměru zakřivení kamenů.

Vzhledem k neměnným rozměrům převodové skříně a zdvihu řadicího mechanismu je daný poloměr trajektorie pohybu řadicích kamenů a tím pádem i úhel natočení (viz kapitolu 5.1). Z toho vyplývá, že jedinými dvěma parametry pro návrh jsou: poloměr křivosti kamenů r a požadovaná vůle v neutrálu. Jelikož už mám za sebou experiment a životnostní zkoušky na zkušebním stavu, tak jsem se rozhodl i v případě vidličky 5. rychlostního stupně držet nejlepší varianty z předchozích zkoušek – vůle v neutrálu $v_n = 0,9 \text{ mm}$.

Pro vybrané tři varianty křivosti kamenů jsem provedl výpočet a jeho výsledky uvádím dále v tabulce (Tabulka 10).

Tabulka 10: Vypočtené parametry pro varianty řadicích kamenů 5. rychlostního stupně

	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3
Poloměr zakřivení kamenů r [mm]	14	18	22
Vzdálenost bodu dotyku od spojnice středů zakřivení kamenů h [mm]	1,87	2,41	2,94
Minimální vzdálenost kamenů v neutrálu v_1 [mm]	7,40	7,40	7,40
Axiální vůle v neutrálu v_n [mm]	0,90	0,90	0,90
Minimální vzdálenost kamenů po zařazení v_2 [mm]	7,08	7,01	6,94
Axiální vůle po zařazení v_z [mm]	0,58	0,51	0,44

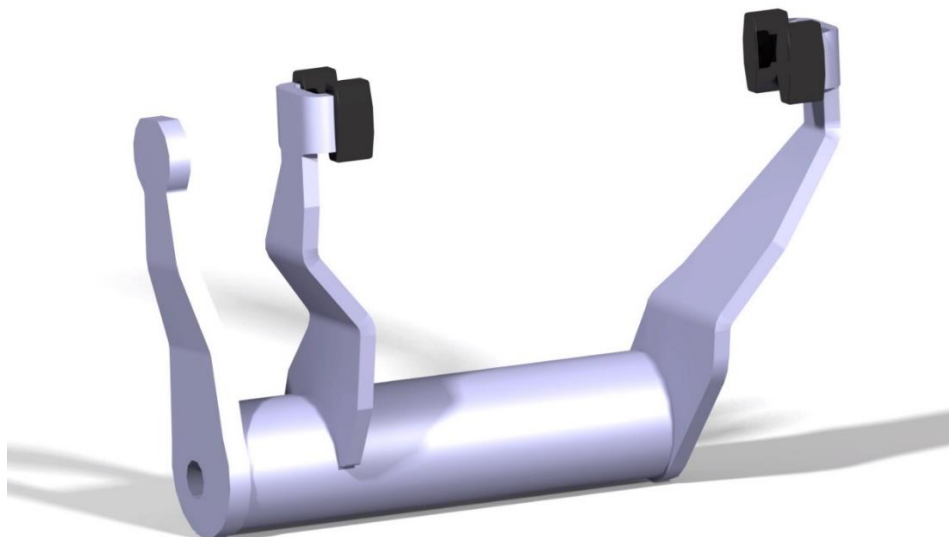
Z tabulky je zřejmé, že s klesajícím poloměrem zakřivení se zlepšují dva sledované parametry. Je třeba si ale uvědomit, že s klesajícím poloměrem zakřivení se rovněž zmenšuje kontaktní plocha mezi kamenem a objímkou. Kontakt je teoreticky bodový, jelikož se objímka tečně dotýká kamene, ale ve skutečnosti dojde k deformaci plastového kamene a vytvoří se určitá dosedací plocha. S klesajícím poloměrem zakřivení se kontaktní plocha zmenšuje při současném větším zatížení materiálu kamene v jejím středu. Z tohoto důvodu jsem pro konstrukci kamenů vybral *Variantu 2*, tj. poloměr zakřivení kamenů $r = 18 \text{ mm}$.

Provedení vidličky jsem zvolil totožné se současným řešením – laserově svařené profilované ocelové plechy. Jako materiál jsem zvolil pevnostní ocel pro tváření za studena S600MC. Zároveň jsem provedl změny pouze na dvou částech vidličky – na ramenech nesoucích řadicí kameny. Páku ovládanou řadicím mechanismem a spodní válcovou část jsem ponechal beze změny, z důvodu dříve zmíněné kompatibility se současným řešením.

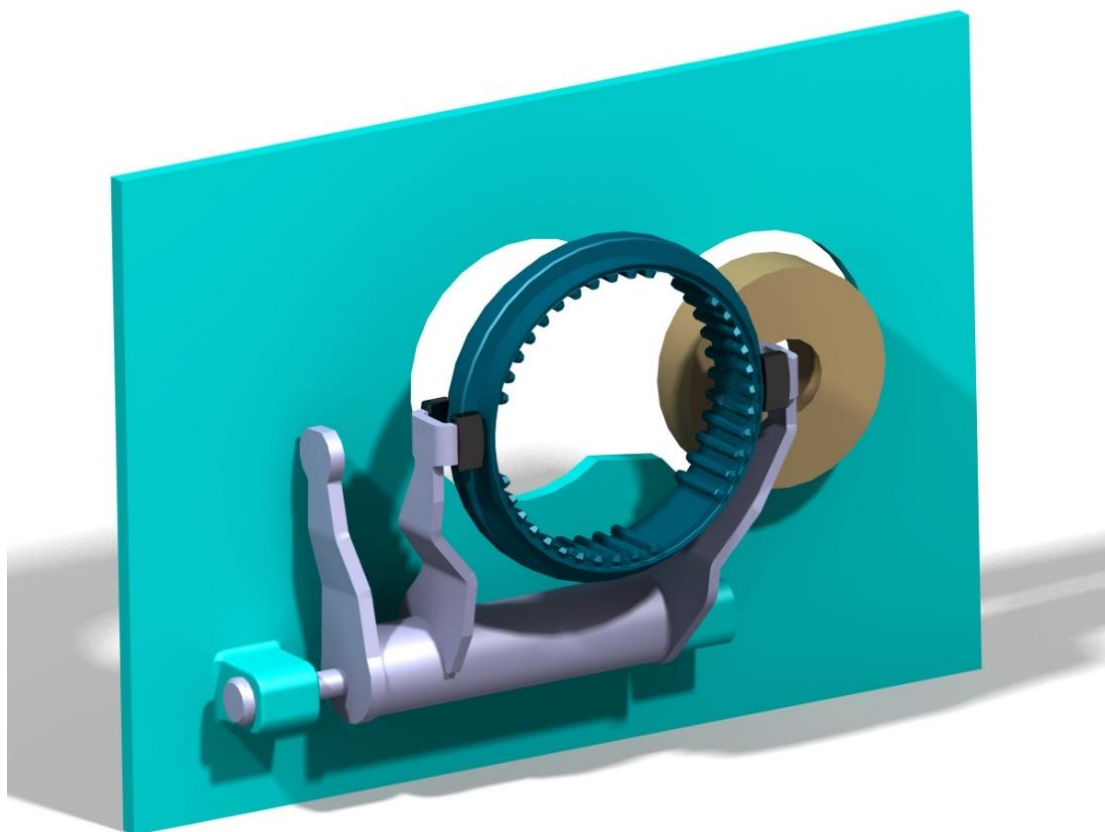
Celá řadicí vidlička je samozřejmě řešena symetricky, stejně jako její pohyb v převodovce. To znamená, že může být použita i do šestirychlostního provedení převodovky.

Při návrhu vidličky jsem si změnil připojovací rozměry ke skříni a ozubené kolo pátého rychlostního stupně, abych zamezil případné kolizi vidličky s jinou součástí v převodovce. Následující obrázky (Obrázek 56, Obrázek 57, Obrázek 58) ukazují jak samotnou vidličku,

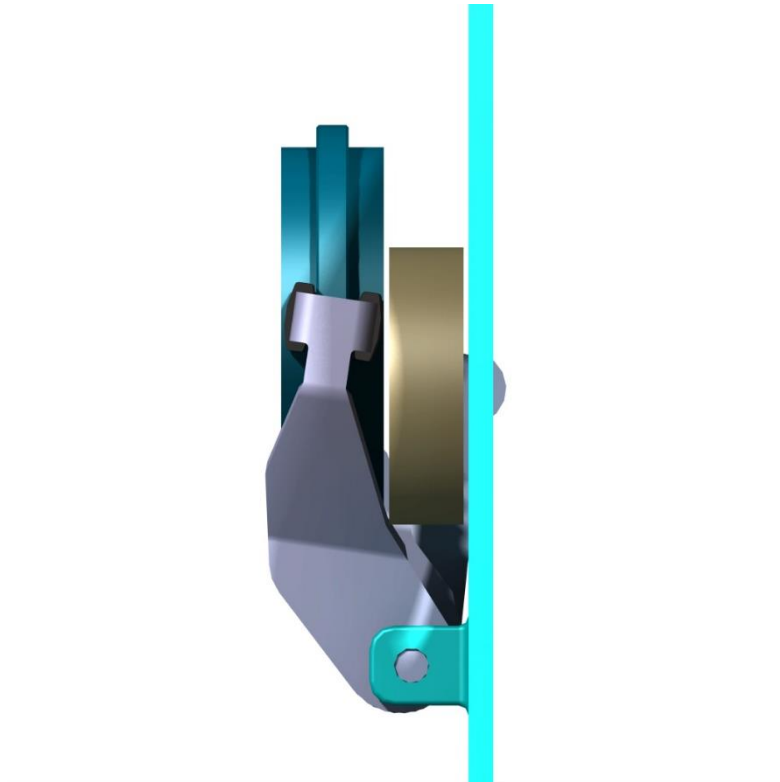
tak její sestavu společně s objímkou, částí převodové skříně a ozubeného kola pátého rychlostního stupně, i zařazenou polohu pátého rychlostního stupně.



Obrázek 56: Navržená vidlička pátého rychlostního stupně



Obrázek 57: Sestava navržené vidličky s objímkou



Obrázek 58: Navržená vidlička v poloze zařazeného 5. rychlostního stupně

Kompletní výkresovou dokumentaci naleznete v přílohách této diplomové práce

5.3. MKP analýza navržených řešení

Obě navržená řešení jsem podrobil MKP výpočtům pro totožné zatížení jako v případě prototypů – řadicí síla o velikosti 1 000 N.

Tabulka 11: Výsledky MKP analýzy navržených součástí

Součást	Řadicí kameny 3. a 4. rychl. stupně	Řadicí vidlička 5. rychl. stupně
Materiál	S235JR	S600MC
Maximální napětí dle MKP [MPa]	136	536
Mez kluzu materiálu [MPa]	235 [14]	600 [14]
Bezpečnost vůči mezi kluzu [1]	1,73	1,12

Z tabulky výsledků (Tabulka 11) je patrné, že bezpečnosti proti mezím kluzu jednotlivých součástí jsou větší než 1. Proto se dají obě navržené součásti považovat za dostatečně dimenzované.

6. Závěr

Cílem této závěrečné práce byla konstrukce řadicí vidličky s odlišným způsobem řazení převodových stupňů pro převodovku MQ200 od firmy Škoda Auto. V první řadě jsem provedl koncepční návrh inverzní objímky vyráběné práškovou metalurgií, dále jsem vyrobil její prototyp pomocí konvenčních technologií za účelem simulace budoucího tvaru. Pokračoval jsem návrhem a výrobou tří variant prototypů řadicích kamenů, ze kterých jsem vybral nejvhodnější variantu na základě vyhodnocení úspěšnosti řazení pomocí přemístěného sensoru posuvu na zkušebním stavu v laboratořích FS ČVUT. Dále jsem provedl životnostní zkoušku vybrané varianty na řadicí vidličce 3. a 4. rychlostního stupně, která proběhla bez problémů a prověřila funkčnost prototypů po takřka 25% životnosti řadicího mechanismu převodovky.

Na základě zjištěných informací a průběhů zkoušek jsem nakonec provedl samotný návrh řadicí vidličky 5. rychlostního stupně a řadicích kamenů 3. a 4. rychlostního stupně pro objímku vyráběnou práškovou metalurgií.

Z průběhu zkoušek a kontrolních výpočtů je patrné, že navržený princip inverzní objímky s řadicími kameny je funkční. Vzhledem k vysokým počtům vyrobených převodovek a lacinější výrobě objímek by byla tato úprava z dlouhodobého hlediska zřejmě velkým ekonomickým přínosem.

Pro nasazení tohoto řešení do sériové výroby by bylo třeba vyrobit navržené kameny a vidličku a podrobit je důkladným životnostním testům. Dále by bylo třeba provést důkladnou ekonomickou analýzu zavedení nového technologického postupu do sériové výroby.

Seznam zkratek a symbolů

Zkratka	Jednotka	Popis
F	[N]	Řadicí síla
T_R	[Nm]	Třecí krouticí moment
T_Z	[Nm]	Krouticí moment od dotyku ozubení
A_{ob}	[mm ²]	Kontaktní plocha kroužku s objímkou
D_{ob}	[mm]	Vnitřní průměr kroužku na objímce
h_{kr}	[mm]	Šířka kroužku na objímce
F_{ob}	[N]	Maximální síla působící na objímku
τ_s	[MPa]	Smykové napětí ve spoji kroužek - objímka
v_{min}	[mm]	Minimální vůle ve spoji
v_{max}	[mm]	Maximální vůle ve spoji
ρ_{max}	[mm]	Maximální přesah ve spoji
v_n	[mm]	Axiální vůle mezi kamenem a objímkou
R_m	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
$R_{p0,2}$	[MPa]	Smluvní mez kluzu při prodloužení 0,2%
A_{50}	[%]	Tažnost (zkušební délka vzorku 50mm)
φ_i	[°]	Úhel natočení vidličky i-tého stupně po zařazení
R_i	[mm]	Poloměr otáčení i-tého řadicího kamene při řazení
x_i	[mm]	Horizontální posuv i-tého řadicího kamene po zařazení
y_i	[mm]	Vertikální posuv i-tého řadicího kamene po zařazení
W	[mm]	Vzdálenost středů křivosti řadicích kamenů
r	[mm]	Poloměr křivosti řadicího kamene 5. rychl. stupně
h	[mm]	Vzdálenost bodu dotyku kamene s objímkou od spojnice středů křivosti kamenů
v_2'	[mm]	Podélná vzdálenost bodů dotyku kamenů s objímkou po zařazení
v_2	[mm]	Horizontální (minimální) vzdálenost bodů dotyku kamenů s objímkou po zařazení
v_z	[mm]	Axiální vůle mezi kameny a objímkou po zařazení

Seznam použité literatury

- [1] VLK, František. Převody motorových vozidel. Brno: František Vlk, 2006. ISBN 80-239-6463-1.
- [2] NAUNHEIMER, H., BERTSHCE, B., RYBORZ, J., NOVAK, W. Automotive Transmissions: Fundamentals, Selection, Design and Application. Berlín: Springer-Verlag, 2011. ISBN 978-3-642-16216-8
- [3] HOERBIGER. Basics of Synchronizers. [Online] [Citace: 15. květen 2019.] https://www.hoerbiger.com/upload/file/2013_basicsofsynchronizers.pdf.
- [4] POWDER METALLURGY FOR MANUFACTURING. The Library Of Manufacturing [online]. [Citace: 2019-06-18]. Dostupné z: https://thelibraryofmanufacturing.com/powder_processes.html
- [5] Powder Metallurgy. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-06-18]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Powder_metallurgy
- [6] Design Considerations with Powder Metallurgy. PICKPM [online]. [cit. 2019-06-18]. Dostupné z: <https://www.pickpm.com/design-resource-center/design-considerations>
- [7] Design and Mechanical Properties. Höganäs AB [online]. SE-263 83 Höganäs, Sweden [cit. 2019-06-18]. Dostupné z: https://www.hoganas.com/globalassets/download-media/sharepoint/handbooks---all-documents/handbook-3_design_and_mechanical_properties_june2015_1039hog-interactive.pdf
- [8] VOLKSWAGEN AG. Manual Gearbox 02T. [Online] [Citace: 26. březen 2019.] www.volkspage.net/technik/ssp/ssp/SSP_237_d1.pdf.
- [9] ŠKODA AUTO vyrobila v Mladé Boleslavi sedmimiliontou převodovku typu MQ 200. ŠKODA AUTO a.s. [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <http://www.skoda-auto.cz/novinky/novinky-detail/2018-11-12-sedmimilionta-prevodovka>
- [10] ŠKODA AUTO vyrobila desetimiliontou převodovku. ŠKODA AUTO a.s. [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <http://www.skoda-auto.cz/novinky/novinky-detail/2017-10-19-deset-mil-prevodovek>
- [11] Henkel Europe. LOCTITE® 638™. [Online] Srpen 2016. [Citace: 29. duben 2019.] Technický list. <http://tds.henkel.com/tds5/search.asp?t=638>.
- [12] KEMPER: Datasheet CuSn6 [online]. [cit. 2019-06-20]. Dostupné z: https://www.kemper-olpe.de/fileadmin/contents/kemper/pdf/Datenbl%C3%A4tter/Data_Sheet_CuSn6_04-2013.pdf
- [13] PAKOSTA, J., ACHTENOVÁ, G. Návrh setrvačnickového zkušebního stavu pro zkoušky řazení převodovek. Mezinárodní konference kateder dopravních, manipulačních, stavebních a zemědělských strojů. Liberec: Technická universita v Liberci, 2015. Konferenční příspěvek. ISBN 978-80-7494-196-2.
- [14] Přehled vlastností oceli S235JR (dříve S235JRG2). Bohdan BOLZANO s.r.o. [online]. 2019 [cit. 2019-07-02]. Dostupné z: <https://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/nelegovane-konstrukcni-oceli-podle-en-10025/prehled-vlastnosti-oceli-s235jrdrive-s235jrg2>
- [15] Pevnostní oceli k tváření za studena. NYPRO [online]. 2019 [cit. 2019-06-25]. Dostupné z: <https://nyprohutni.cz/pevnostni-za-studena>

Seznam obrázků

Obrázek 1: Řazení přesuvnými koly [1].....	3
Obrázek 2: Řazení zubovou spojkou bez synchronizace [1]	4
Obrázek 3: Rozpad synchronizační spojky Borg-Warner [1].....	5
Obrázek 4: Řez synchronizační spojkou Borg Warner [1].....	5
Obrázek 5: Proces řazení s jištěnou synchronizací [1].....	6
Obrázek 6: Synchronizační spojka s dvojitým třecím kuželem [3].....	8
Obrázek 7: Tvary částic kovových prášků [4].....	9
Obrázek 8: Nevyrobitelná drážka [7]	10
Obrázek 9: Nevyrobitelná díra [4].....	10
Obrázek 10: Vlevo možné provedení hran,	10
Obrázek 11: a) nevyrobitelné zaoblení,.....	10
Obrázek 12: Řez převodovkou MQ200 – pětirychlostní provedení [3]	11
Obrázek 13: Řez převodovkou MQ200 – šestirychlostní provedení [3]	12
Obrázek 14: Řadicí mechanismus MQ200 – ilustrace, starší verze [3].....	13
Obrázek 15: Půlměsíkový řadicí kamen s trojbodovým stykem	15
Obrázek 16: Řadicí mechanismus MQ200 – starší verze	15
Obrázek 17: Vyjímatelné řadicí kameny	16
Obrázek 18: Řadicí vidlička V. rychlostního stupně (starší verze)	16
Obrázek 19: Řadicí mechanismus MQ200 – nová verze.....	16
Obrázek 20: Nová verze řadicích kamenů s třibodovým stykem (zakroužkováno).....	17
Obrázek 21: Řadicí vidlička V. rychlostního stupně (nová verze)	17
Obrázek 22: Řadicí kamen V. rychlostního stupně (nová verze)	17
Obrázek 23: Původní řadicí objímka s drážkou.....	18
Obrázek 24: Model prototypu řadicí objímky.....	18
Obrázek 25: Model prototypu řadicího kamene	19
Obrázek 26: Zjednodušený model sestavy	19
Obrázek 27: Rozměry původní objímky (bez tolerancí)	20
Obrázek 28: Rozměry prototypu objímky (bez tolerancí)	20
Obrázek 29: Graf závislosti pevnosti lepeného spoje na teplotě [11].....	21
Obrázek 30: Přípravek pro výrobu prototypu řadicí objímky – řez	22
Obrázek 31: Přípravek pro výrobu prototypu řadicí objímky – rozebraný stav	23
Obrázek 32: Prototyp řadicí objímky	24
Obrázek 33: Rozměry prototypu řadicího kamene 3./4. stupně.....	25
Obrázek 34: Rozměry prototypu řadicího kamene 5. stupně.....	25
Obrázek 35: Okrajové podmínky MKP analýzy prototypů řadicích kamenů	26
Obrázek 36: Kritické místo prototypu kamene 3. a 4. rychlostního stupně	27
Obrázek 37: Kritické místo prototypu kamene 5. rychlostního stupně.....	28
Obrázek 38: Schéma zkušebního setrvačnickového stavu [13].....	29
Obrázek 39: Nové umístění sensoru polohy.....	31
Obrázek 40: Měřící hrot sensoru polohy	32
Obrázek 41: Graf úspěšného řazení.....	34
Obrázek 42: Graf neúspěšného řazení.....	35
Obrázek 43: Řadicí kamen 5. rychlostního stupně po 2010 přeřazeních	36
Obrázek 44: Měření tloušťky boků řadicích kamenů 3. a 4. rychlostního stupně.....	37
Obrázek 45: Sestava hřídelů převodovky s prototypem objímky.....	37
Obrázek 46: Prototypy řadicích kamenů 3. a 4. rychlostního stupně ve vidličce	38
Obrázek 47: Řadicí kamen 3. a 4. rychlostního stupně č. 1 po 80 000 zařazeních	40
Obrázek 48: Řadicí kamen 3. a 4. rychlostního stupně č. 2 po 80 000 zařazeních	40
Obrázek 49: Řadicí objímka po 80 000 zařazeních	40
Obrázek 50: Schéma pohybu řadicích kamenů 3. a 4. rychlostního stupně při řazení.....	42
Obrázek 51: Poloměry otáčení kamenů ve vidličkách	43

Obrázek 52: Sestava CAD modelu navržených řadicích kamenů 3. a 4. rychlostního stupně s řadicí objímkou	45
Obrázek 53: CAD model navržených řadicích kamenů 3. a 4. rychlostního stupně	45
Obrázek 54: Schéma natočené vidličky 5. rychlostního stupně	46
Obrázek 55: Detailní schéma natočené vidličky 5. rychlostního stupně	47
Obrázek 56: Navržená vidlička pátého rychlostního stupně	50
Obrázek 57: Sestava navržené vidličky s objímkou	50
Obrázek 58: Navržená vidlička v poloze zařazeného 5. rychlostního stupně	51

Seznam tabulek

Tabulka 1: Rozměrové tolerance prototypu objímky	23
Tabulka 2: Materiálové vlastnosti CuSn6 [12]	26
Tabulka 3: Bezpečnosti vůči mezi kluzu navržených prototypů řadicích kamenů.....	28
Tabulka 4: Životnostní zkouška firmy Škoda Auto	33
Tabulka 5: Úspěšnost zařazení 5. rychlostní stupeň dle vyhodnocení průběhu řazení.....	35
Tabulka 6: Úspěšnost zařazení 5. rychlostní stupeň dle řadicího robota	35
Tabulka 7: Srovnání životnostních testů se zkušebním cyklem Škoda Auto	39
Tabulka 8: Úbytek materiálu na bocích řadicích kamenů.....	40
Tabulka 9: Rozbor natočení posuvů kamenů při řazení	44
Tabulka 10: Vypočtené parametry pro varianty řadicích kamenů 5. rychlostního stupně	49
Tabulka 11: Výsledky MKP analýzy navržených součástí.....	51

Seznam příloh

- PŘÍLOHA č. 1: Výkres prototypu řadicího kamene 3. a 4. rychlostního stupně
- PŘÍLOHA č. 2: Výkres prototypu řadicího kamene 5. rychlostního stupně
- PŘÍLOHA č. 3: Výkres sestavy řadicího kamene 3. a 4. rychlostního stupně
- PŘÍLOHA č. 4: Výkres řadicího kamene 3. a 4. rychlostního stupně
- PŘÍLOHA č. 5: Výkres půlměsíce pro sestavu řadicího kamene 3. a 4. rychlostního stupně
- PŘÍLOHA č. 6: Výkres plastového řadicího kamene 3. a 4. rychlostního stupně
- PŘÍLOHA č. 7: Výkres sestavy řadicí vidličky 5. rychlostního stupně
- PŘÍLOHA č. 8: Výkres pravého ramene řadicí vidličky 5. rychlostního stupně
- PŘÍLOHA č. 9: Výkres levého ramene řadicí vidličky 5. rychlostního stupně
- PŘÍLOHA č. 10: Výkres zaobleného plastového řadicího kamene 5. rychlostního stupně
- PŘÍLOHA č. 11: Naměřená a vyhodnocená data pro výběr vhodné vůle kamen - objímka