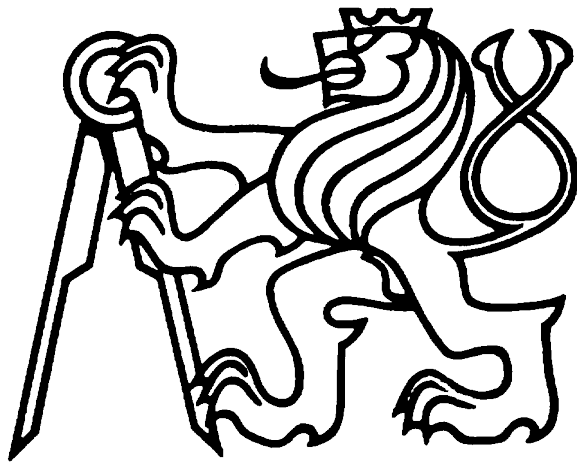


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V
PRAZE

Fakulta strojní



Rešerše diferenciálů používaných na
vozech Formula Student

Autor: Jonáš Valský

Vedoucí práce: Nikita Astraverkhau



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student: **Jonáš VALSKÝ**

program: **Teoretický základ strojního inženýrství**

obor: **bez oboru**

název česky: **Rešerše diferenciálů používaných na vozech Formula Student**

název anglicky: **Benchmarking of Differentials Used on Formula Student Vehicles**

Zásady pro vypracování:

1. Provedte rešerši diferenciálů používaných pro vozy kategorie Formula Student
2. Navrhněte postup měření svornosti diferenciálu ve voze Formula Student
3. Provedte měření vlivu nastavení svornosti diferenciálu pro disciplínu Skid-pad. V rámci měření zjistěte minimální dosažitelnou svornost diferenciálů používaného ve voze FS.05.

Rozsah průvodní zprávy: 20 stran

Rozsah grafických prací:

Seznam doporučené literatury:

[1]

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Nikita Astraverkhau

Konzultant bakalářské práce:

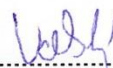
Datum zadání bakalářské práce: 30. dubna 2015

Datum odevzdání bakalářské práce: 19. června 2015

Neodevzdá-li student bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé.

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

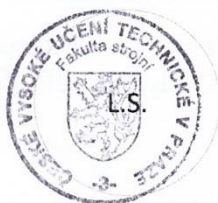
Zadání bakalářské práce převzal dne:


 20.4. 2015

Student


Doc. Ing. Oldřich VÍTEK, Ph.D.

Vedoucí ústavu




Prof. Ing. Michael VALÁŠEK, DrSc.

Děkan fakulty

V Praze dne 7. dubna 2015

Anotační záznam

Jméno autora:	Jonáš Valský
Název práce:	Rešerše diferenciálů používaných na vozech Formula Student
Rozsah práce:	20 stran
Školní rok vyhotovení:	2015
Ústav:	12120 - Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Nikita Astraverkhau

Bibliografická citace této práce

VALSKÝ, Jonáš. Rešerše diferenciálů používaných na vozech Formula Student. PRAHA, 2015. Bakalářská práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Nikita Astraverkhau

Abstrakt

Tato bakalářská práce představuje rešerši různých typů diferenciálů a jejich využití. Dále se práce zabývá vlivem použitých diferenciálů na jízdní vlastnosti a podrobněji se věnuje diferenciálu Drexler často používaným v soutěži Formula Student. Cílem této práce je ohodnotit vliv různých nastavení svornosti diferenciálu Drexler ve voze FS.05 na jízdní vlastnosti a vyhodnotit použití konkrétních nastavení pro soutěž Formula Student.

Abstract

This bachelor thesis presents a comparison of various types of differentials and their usage. In following part the thesis deals with influence of differential on driveability. It deals closely with Drexler differential which is often used in Formula Student competition. The goal of this thesis is to evaluate the effect on car's driveability by various settings of lockup ratio on Drexler differential used on FS.05 vehicle. Further goal is to evaluate the use of specific settings in Formula Student competition.

Klíčová slova

Diferenciál, svorný diferenciál, Drexler, točivý moment

Key words

Differential, limited slip differential, Drexler, torque

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

podpis

Poděkování

Úvodem této práce bych chtěl Ing. Nikitovi Astraverkhau za cenné informace a rady při řešení této práce.

Dále bych chtěl poděkovat Michalovi Slanému za pomoc při nastavování svornosti diferenciálu.

Obsah

Úvod	9
1. Diferenciály	10
1.1 Účel.....	10
1.2 Rozdělení diferenciálů.....	10
1.2.1 Kuželový diferenciál	11
1.2.2 Závěr diferenciálu.....	13
1.2.3 Svorné diferenciály.....	13
1.2.4 Diferenciál Loc-O-Matic	15
1.2.5 Šnekové diferenciály	17
1.2.6 Diferenciál Torsen typu A.....	17
1.2.7 Diferenciál Torsen typu B.....	18
1.2.8 Diferenciál s viskózní spojkou	19
1.2.9 Diferenciál Drexler LSD v2010.....	20
1.3 Typy diferenciálů používaných dalšími týmy v soutěži Formula Student ..	24
2. Vliv diferenciálu na jízdní vlastnosti.....	26
2.1 Vliv kuželového diferenciálu	26
2.2 Vliv uzavřeného diferenciálu.....	27
2.3 Vliv diferenciálu typu Limited slip.....	27
2.4 Vliv diferenciálu Torsen.....	27
3. Dynamické disciplíny.....	28
3.1 Akcelerace	28
3.2 Jízda v osmičce	28
4. Návrh postupu měření svornosti diferenciálu Drexler LSD v2010.....	29
5. Měření vlivu nastavení svornosti diferenciálu	31
Závěr.....	36
Literatura a zdroje.....	37
Seznam použitých zkratk a symbolů	39
Seznam příloh.....	40

Úvod

Při průjezdu vozidla zatáčkou dochází k rozdílným otáčkám vnitřního a vnějšího kola vlivem různých poloměrů zatáčky a tím různě dlouhých drah, které musí každé kolo urazit. Tento problém rozdílných otáček obou poháněných kol řeší diferenciál.

Při průjezdu vozidla zatáčkou také dochází k odlehčování vnitřního a naopak zatěžování vnějšího kola vlivem bočního zrychlení, které při závodním stylu jízdy může nabývat velmi významných hodnot. Tím dochází ke změně velikosti maximálního točivého momentu, který lze přenést na jednotlivá kola. Tento případ nastává i při rozdílných adhezních podmínkách na levém a pravém kole. Kuželový diferenciál (viz kapitola 1.2.1.) rozděluje točivý moment rovnoměrně na obě kola a výsledný moment přenesený na vozovku se řídí podle momentu, který je přenášen na méně zatíženém kole. Tuto nevýhodu řeší tzv. svorné diferenciály, které při rozdílném zatížení hnaných kol nebo při rozdílných trakčních podmínkách nerozdělují točivý moment rovnoměrně a tím umožňují přenášení většího množství momentu než v případě použití kuželového diferenciálu.

1. Diferenciály

„Diferenciál je převodové ústrojí, které zajišťuje samočinné vyrovnávání rozdílných otáček hnacích kol při jízdě v zatáčce a zároveň rozděluje hnací točivý moment na obě vozidlová kola.“ (Vlk; 2000 s. 241)

1.1 Účel

Když automobil projíždí zatáčkou, vnější kolo má delší dráhu než kolo vnitřní a proto se musí otáčet rychleji, aby nedocházelo k prokluzu kol po vozovce. Kola na nepoháněné nápravě se mohou otáčet libovolně a zcela nezávisle na sobě. Na hnané nápravě jsou kola spojena diferenciálem. Kdyby byla kola poháněné nápravy upevněna na pevném hnacím hřídeli, obě by se točila stejnými otáčkami a v zatáčce by docházelo k:

- opotřebení pneumatik
- nárůstu ztrát výkonu a zvýšení spotřeby
- výraznému snížení ovladatelnosti

1.2 Rozdělení diferenciálů

Podle umístění:

- nápravové diferenciály
- mezinápravové diferenciály
(rozdělení točivého momentu mezi přední a zadní nápravu u aut s pohonem všech čtyř kol)

Podle konstrukčního provedení:

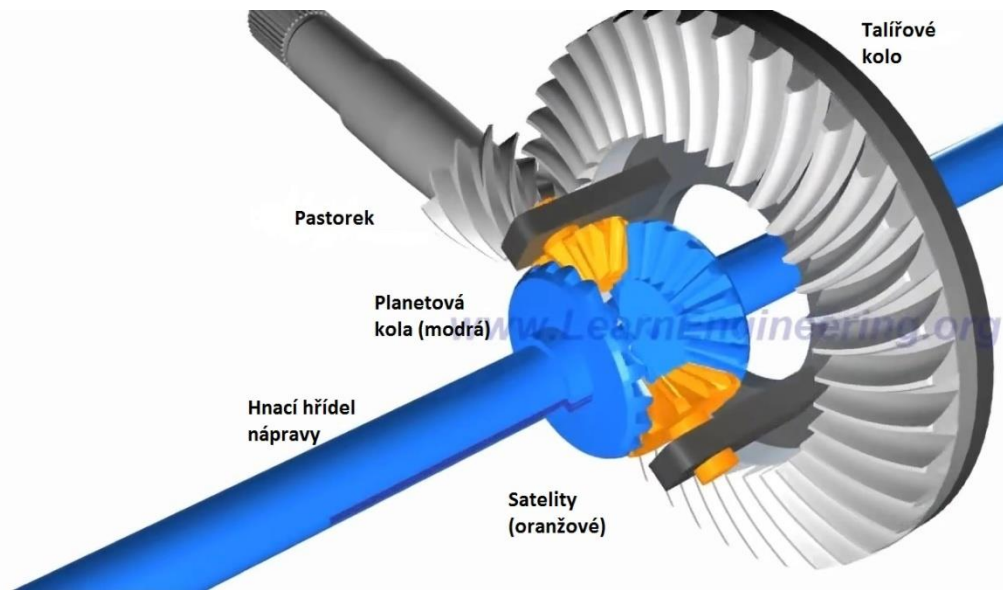
- kuželové
- čelní

Podle funkce:

- otevřené
- s uzávěrkou
- svorné
- symetrické
- nesymetrické

[4]

1.2.1 Kuželový diferenciál



Obrázek 1: Kuželový diferenciál [6]

Tento základní typ diferenciálu (kuželový) se skládá z klece, která je pevně spojena s talířovým kolem a celý mechanismus zakrývá, kuželových (planetových) kol a satelitů. Planetová kola a satelity jsou vzájemně v záběru. Motor pohání pastorek a ten roztáčí talířové kolo. Pokud automobil jede rovně, satelity se netočí kolem vlastní osy a celý mechanismus se točí jako pevný celek. Při jízdě v zatáčce se začnou satelity otáčet kolem své osy a tím vnějšímu kolu umožní o určitý počet otáček předbíhat otáčení klece diferenciálu a vnitřní kolo o stejný počet otáček zpoždovat.

Platí tyto vztahy:

$$n_e = n + \Delta n \quad (1)$$

$$n_i = n - \Delta n \quad (2)$$

n_e jsou otáčky vnějšího kola

n_i jsou otáčky vnitřního kola

n jsou otáčky klece

Točivý moment se přenáší z pastorku na talířové kolo, z něj na čep satelitů diferenciálu a ozubením satelitů na planetová kola. Dále poloosami na kola vozidla. Při tomto uspořádání diferenciálu se točivý moment přenáší na obě kola přesně rovným dílem. Právě kvůli rozdělení točivého momentu přesně na půl mezi obě kola je zcela nevhodné pro závodní použití, protože množství momentu se řídí vždy podle kola, na které se ho může přenést méně.

Platí následující vztahy:

$$M_{l_{max}} = \mu_l \cdot N_l \cdot r_k \quad (3)$$

$$M_{p_{max}} = \mu_p \cdot N_p \cdot r_k \quad (4)$$

N_l a N_p jsou normálové síly působící na kola (zatížení kol)

Pro kuželový typ platí $M_l = M_p$

Pro maximální moment, který lze přenést kuželovým diferenciálem platí:

$$M_{t_{max}} = M_{l_{max}} + M_{p_{max}} = (\mu_l \cdot N_l + \mu_p \cdot N_p) \cdot r_k \quad (5)$$

Se zjednodušujícím předpokladem $N_l = N_p = N$ by tedy platilo:

$$M_{t_{max}} = (\mu_l + \mu_p) \cdot r_k \cdot N \quad (6)$$

Bude-li:

$$\mu_l < \mu_p \quad (7)$$

Tak platí:

$$M_{l_{max}} = M_{p_{max}} = \mu_l \cdot r_k \cdot N \quad (8)$$

A proto:

$$M_{t_{max}} = \mu_l \cdot r_k \cdot N \quad (9)$$

Moment, který lze přenést, se vždy řídí podle menšího součinitele tření μ . [1]

V situacích, kdy jsou kola hnané nápravy na různých površích, nebo dokonce jedno kolo je ve vzduchu a druhé je na pevné zemi, je tento typ diferenciálu naprosto nevhodný. U kola s horším podkladem se velmi snadno dosáhne maximální hodnoty, kterou je kolo schopné přenést a kolo se začne protáčet, čímž se maximální hodnota točivého momentu opět snižuje. Tímto limitem se musí řídit i druhé kolo, protože tento diferenciál nemůže přenést na jedno kolo více točivého momentu, než na druhé. Automobil v těchto situacích není schopen jízdy, protože protáčeující se kolo klade malý odpor a množství celkového točivého momentu přenášeného na obě kola dohromady je příliš malé. V tomto případě je vhodné použití uzávěrky diferenciálu nebo svorného diferenciálu.

1.2.2 Závěr diferenciálu

Závěr diferenciálu zablokuje planetová kola tak, že se vůči kleci diferenciálu nemohou otáčet. To způsobí, že celý diferenciál se otáčí jako pevný celek a automobil se chová, jako kdyby diferenciál neměl, což nabízí značné výhody v obtížných trakčních podmínkách. Výhoda spočívá v tom, že se točivý moment mezi kola nerozděluje přesně na půl jako u standardního diferenciálu, ale v poměru součinitele tření μ . Když jsou obě kola na stejném povrchu tak je točivý moment rozdělován na obě kola stejně, ale když jsou kola na rozdílných površích tak je moment rozdělen v poměru součinitele tření μ . Na levé a pravé kolo se tedy mohou přenést maximálně tyto momenty, aby nedošlo k protočení kol:

$$M = \mu \cdot N \cdot r_{kola} \quad (10)$$

N je normálová síla působící na kolo (zatížení kola)

V extrémním případě, kdy se jedno kolo dostane do vzduchu a druhé je na pevné zemi tak se všechen moment přenáší na kolo na zemi a auto se vyprostí.

K zablokování diferenciálu se používá např. přesuvná objímka. K jejímu zapojení dojde tím, že se po drážkách posune na jednom z hnacích hřídelů kol tak, že se nemohou otáčet satelity a diferenciál je tím vyřazen z provozu.

Další a častěji využívanou možností je zubová spojka. Ta spojuje nejčastěji hřídel jednoho kola a skříň diferenciálu. Zapojením této spojky je diferenciál opět vyřazen z provozu. Nevýhodou těchto řešení je možnost, že řidič po vyproštění vozu zapomene uzávěr vypnout, což může mít za následek poškození nápravy a případně převodového ústrojí.

1.2.3 Svorné diferenciály

Uzavření diferenciálu sice splní svojí funkci, ale vyžaduje pozornost řidiče. Pokud řidič zapomene uzávěrku vypnout, jízda není bezpečná. Tuto nevýhodu odstraňují svorné diferenciály, které spojují funkce kuželového a uzavřeného diferenciálu bez zásahu řidiče. Jejich účinek spočívá ve zvýšení tření v diferenciálu (snížení vlastní účinnosti). „Tento účinek bude zřejmý z následujícího odvození.

Označíme-li třecí momenty na levém a pravém planetovém kole M_{Tl} , M_{Tp} , na satelitu M_{Ts} , pak za předpokladu $n_l > n_p$ (tedy $n_l > n_t$, $n_p < n_t$) platí podle obr. 2:

hnací moment:
$$M_t = (F_l + F_p) \cdot r_{pl} \quad (11)$$

moment na levé planetě:
$$F_l \cdot r_{pl} - M_{Tl} = M_l \rightarrow F_l \cdot r_{pl} = M_l + M_l \quad (12)$$

moment na pravé planetě: $F_p \cdot r_{pl} - M_{Tp} = M_p \rightarrow F_p \cdot r_{pl} = M_p + M_{Tp}$ (13)

moment na satelitu: $F_p \cdot r_s - M_{Ts} = F_l \cdot r_s$

rozšíříme-li poslední rovnici o poloměr r_{pl} dostaneme:

$$F_p \cdot r_{pl} = F_l \cdot r_{pl} + M_{Ts} \cdot \frac{r_{pl}}{r_s} \quad (14)$$

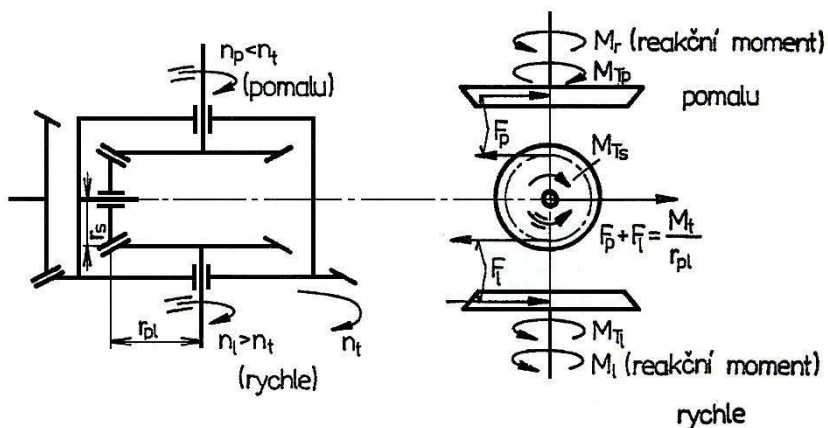
S výše uvedenými závislostmi pro momenty na levé a pravé planetě plyne z posledního vztahu:

$$M_p - M_{Tp} = M_l + M_{Tl} + M_s \cdot \frac{r_{pl}}{r_s} \quad (15)$$

a tedy:

$$M_p = M_l + M_{Tl} + M_{Tp} + M_{Ts} \cdot \frac{r_{pl}}{r_s} \quad (16)$$

Moment na pomalejším hřídeli (M_p) je podle toho větší než na rychlejším hřídeli (M_l).



Obrázek 2: Kinematické a silové poměry na diferenciálu se zvýšeným třením [1]

Třecí momenty jsou tím větší, čím více jsou planetová kola tlačena ke skříní diferenciálu. Přítlak je vzhledem k ozubení proporcionalní s přenášenými momenty; platí

$$M_{Tl} \approx M_l, M_{Tp} \approx M_p.$$

Za předpokladu $M_{Tl} = M_{Tp} = M_{Ts} = 0,1 \cdot M_l$ a $\frac{r_{pl}}{r_s} = 1,5$ plyne pro poměr $\frac{M_p}{M_l}$ z rov. (16):

$$\frac{M_p}{M_l} = 1 + 0,1 + 0,1 + 0,15 = 1,35 \quad (17)$$

Moment přenášený talířovým kolem plyne z výše uvedených vztahů:

$$M_t = M_l + M_p + M_{Tl} - M_{Tp} \quad (18)$$

Jsou-li třecí momenty vlevo a vpravo stejné, potom platí:

$$M_t = M_l + M_p = M_l \cdot \left(1 + \frac{M_p}{M_l}\right) \quad (19)$$

Pro maximální přenášený moment v případě, že levé kolo má menší přilnavost dostaneme:

$$M_l \cdot \left(1 + \frac{M_p}{M_l}\right) = r_d \cdot \mu_l \cdot F \cdot \left(1 + \frac{M_p}{M_l}\right) \quad (20)$$

Pro výše uvedený číselný příklad $\frac{M_p}{M_l} = 1,35$ bude:

$$M_{Tmax} = 2,35 \cdot r_d \cdot \mu_l \cdot F \quad (21)$$

Tedy větší než u diferenciálu bez tření.“ (Vlk; 2000 s. 252-254)

K docílení svornosti diferenciálů se běžně používají kuželové diferenciály s třecími členy, které se montují mezi skříně diferenciálu a hnací hřídele kol. Svornost se udává v procentech nebo v tzv. Torque Bias Ratio (TBR), což je poměr, který udává násobek točivého momentu, který lze přenést z prokluzujícího kola na kolo s dobrou trakcí. Příklad udávané hodnoty může být 4:1, což znamená, že lze na kolo s dobrou trakcí přenést 4 krát více točivého momentu než na kolo s trakcí špatnou. Převedeno na procenta by bylo možné říci, že diferenciál má 80% svornost. [14]

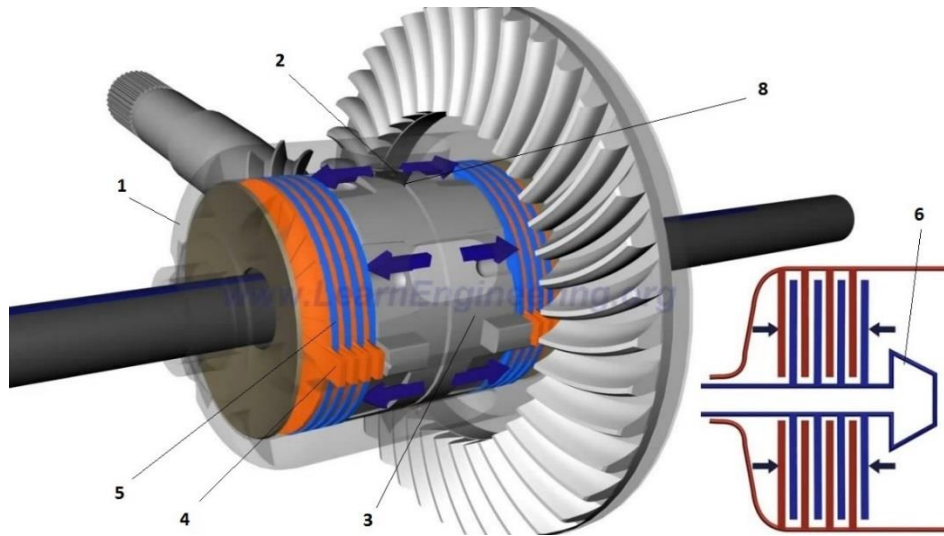
1.2.4 Diferenciál Loc-O-Matic

Patří do kategorie LSD (Limited slip-s omezeným prokluzem). Svornost diferenciálu může být řešena v závislosti na velikosti přenášeného momentu nebo ve spolupráci s přítlakem vyvolaným pružinou.

U diferenciálu typu Loc-O-Matic protáčení diferenciálu brzdí třecí lamelová brzda a intenzita brždění je úměrná přenášenému momentu.

„Točivý moment se z klece diferenciálu 1 přenáší přes čep satelitů 2 na dva přítláčné kroužky 3. Přítláčné kroužky se otáčejí společně s klecí, avšak mohou se axiálně posouvat. Mezi těmito kroužky je v klínové drážce 8 sevřen čep satelitů 2. Při přenosu točivého momentu obvodová síla na skříně diferenciálu vytlačuje čep z klínovité drážky, tím vzniká axiální síla odtlačující přítláčné kroužky 3 směrem k lamelovým spojkám. Vnější lamely spojek 4 jsou spojeny s klecí, vnitřní lamely 5 jsou nasunuty do drážek na planetových kolech 6. Tření mezi lamelami snižuje vzájemný

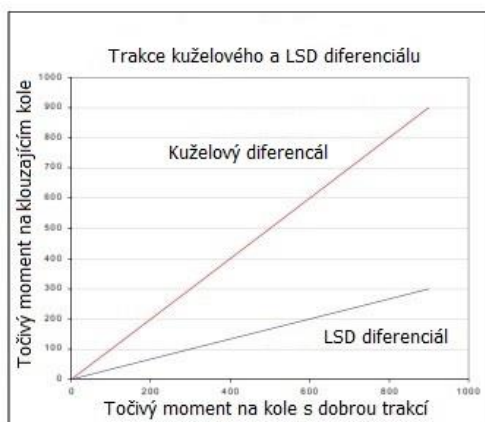
rozdíl úhlových rychlostí obou výstupů. Čím vyšší je přenášený moment, tím větší je třecí moment.“ (Achtenová 2011 s. 21)



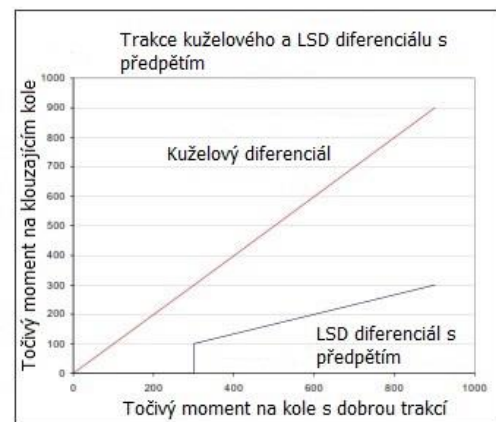
Obrázek 3: Svorný diferenciál Limited slip [6]

Úhlem klínu lze měnit svornost diferenciálu. Klínovité výřezy jsou orientované v obou směrech, takže lamelám každé strany přísluší dvojice satelitů.

Výhoda použití tohoto typu diferenciálu oproti kuželovému z hlediska trakce je vidět z následujících grafů. U diferenciálů typu LSD se často používá stálé předpětí generované například talířovou pružinou. To má tu výhodu, že i v případě, že má jedno kolo minimální trakci, lze na kolo s dobrou trakcí přenést alespoň nějaký točivý moment. V případě bez stálého předpětí, i kdyby měl diferenciál vysokou svornost například 4:1, se na kolo s dobrou trakcí přeneše čtyřnásobek točivého momentu, ale moment, který lze přenést na kolo s minimální trakci je tak malý, že i čtyřnásobek tohoto momentu je stále zanedbatelný. [14]



Obrázek 4: Trakce kuželového a LSD diferenciálu [12]



Obrázek 5: Trakce kuželového diferenciálu a LSD diferenciálu s předpětím [12]

1.2.5 Šnekové diferenciály

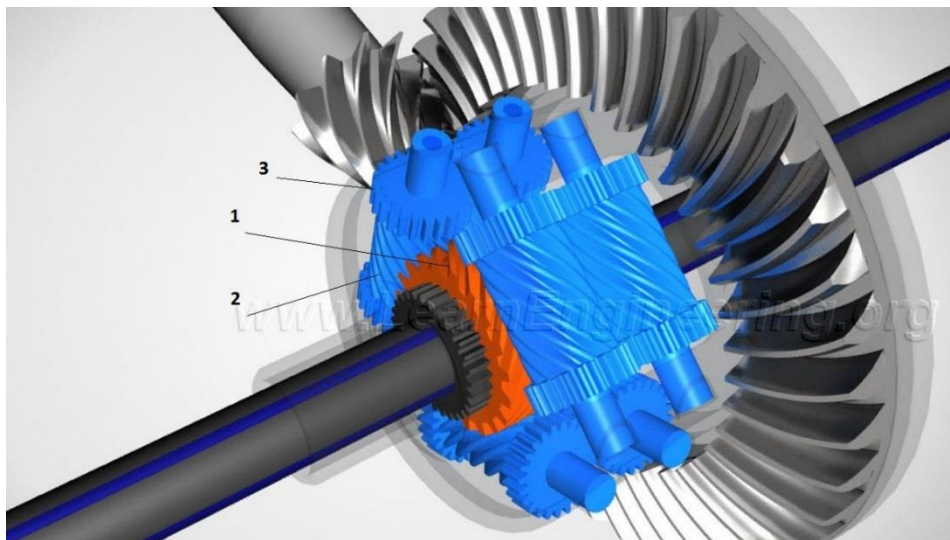
Nízká vlastní účinnost, kterou svorné diferenciály potřebují, je dosažena nízkou účinností záběru šnekového soukolí. Účinnost soukolí závisí na úhlu stoupání šneku, na počtu zubů, tvaru šneku a šnekového kola. Výhodou šnekových soukolí je možnost přenosu vysokých výkonů a dosahování vysokých převodových poměrů ($i=10-80$). Obecnou nevýhodou šnekového převodu je skluz v ozubení, způsobující ztráty třením, což ale v případě použití v mechanismu diferenciálu je výhodou. Šneková soukolí jsou drahá a náročná na výrobu a v důsledku tření mají nižší životnost.

1.2.6 Diferenciál Torsen typu A

Název tohoto typu šnekového diferenciálu je odvozený z jeho charakteristické vlastnosti – citlivosti na změny točivého momentu (torque-sensing). Tento typ diferenciálu, využívá vlastností šnekového převodu, který dovoluje přenášet točivý moment ze šneku 1 na šnekové kolo 2, ale nikoliv naopak. To znamená, že kolo se ve špatných trakčních podmínkách nemůže protočit, protože je přes poloosu spojeno se šnekem. Ten roztočí příslušné šnekové kolo, které je spojeno s druhým šnekovým kolem pomocí přímého ozubení 3, ale to nemůže roztočit svůj šnek. Proto se ve zhoršených adhezních podmínkách díky tomuto principu nemůže jedno kolo volně protáčet vůči druhému kolu.

Při přímé jízdě a stejné adhezi kol se šneková kola otáčejí pouze kolem šneku, ale ne kolem svojí vlastní osy, diferenciál se otáčí jako celek a na každé kolo se přenáší stejný hnací moment. Jakmile automobil vjede do zatáčky, šneková kola se začnou otáčet kolem svých os proti sobě a díky čelnímu ozubení se točí stejnou rychlostí (jedno kolo se proti kleci diferenciálu točí např. o 10% rychleji a druhé kolo o 10% pomaleji).

„Svornost, respektive mechanická účinnost diferenciálu závisí na geometrii ozubení šnekového soukolí a může dosáhnout až 90% (tedy mechanická účinnost



Obrázek 6: Diferenciál Torsen typ A [6]

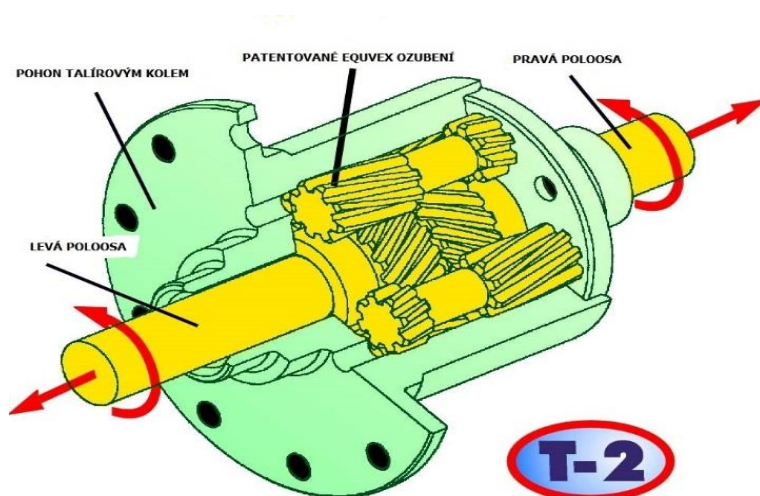
10%).“ Svorného účinku se dosahuje třením ve šroubovém ozubení planetových kol a satelitů. Tento typ má však několik nevýhod. Jsou jimi cena, hluchost a náročnější sestavení. [7]

1.2.7 Diferenciál Torsen typu B

Jedná se o podobný typ diferenciálu jako v případě typu A s tím rozdílem, že všechny šneky a šneková kola jsou nahrazeny čelními koly se šikmým ozubením patentovaným pod názvem Equvex™. „Vstupním členem je klec diferenciálu, ve které leží dvojice spolu zabírajících satelitů. Výraz „leží“ asi nejlépe popisuje skutečnost, neboť satelity v unašeci nejsou uloženy na čepech, ale leží ve výřezech. Po obvodu klece je rovnoměrně rozmístěno několik dvojic satelitů. Satelity zabírají vzájemně mezi sebou a každý ze satelitů zabírá s jedním planetovým kolem. Planety jsou výstupními koly diferenciálu. Jak již bylo řečeno, všechna kola mají čelní šikmé ozubení. Při záběru tedy vznikají axiální síly, jež přitlačují plovoucí satelity i planetová kola na třecí kroužky. Celkem jsou tedy v diferenciálu Torsen typu B čtyři hlavní zdroje zvýšeného tření:

- dotek boků planetových kol o klec diferenciálu
- dotek boků satelitů o klec diferenciálu
- tření hlavových průměrů satelitů o kruhové výřezy v kleci diferenciálu
- záběr šikmého čelního ozubení

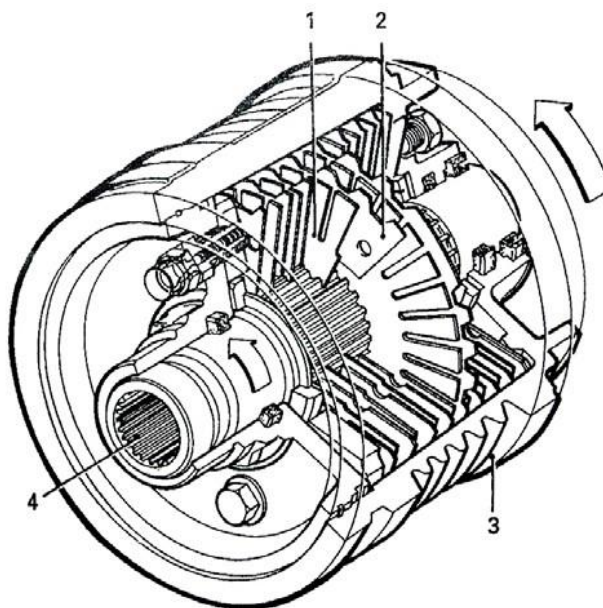
„Svornost se samozřejmě dá vyladit návrhem geometrie ozubení, zejména volbou úhlu šroubovice šikmého ozubení, přidavnými třecími kroužky, počtem satelitových dvojic, apod. Svornost u tohoto diferenciálu se pohybuje od 16 do 50 %. Při přímé jízdě rozděljuje tento typ diferenciálu (obdobně jako Torsen typu A) točivý moment rovnoměrně mezi výstupní hřídele. Znamená to, že může pracovat jako mezinápravový i nápravový diferenciál.“ (Achtenová 2011 s. 24)



Obrázek 7: Torsen typu B [8]

1.2.8 Diferenciál s viskózní spojkou

Ve skříní diferenciálu naplněné viskózní silikonovou kapalinou se nachází kuželový typ diferenciálu a vícelamelová spojka. Každá ze dvou sad lamel je spojena s jednou poloosou. Jsou-li adhezní podmínky pravého a levého kola stejné, otáčí se spojka jako celek. Účinek tohoto typu diferenciálu vzrůstá s rozdílem otáček. Při normálním zatáčení skoro nepůsobí, ale velmi silně uzavírá, jestliže se jedno kolo začne otáčet o hodně rychleji než druhé.



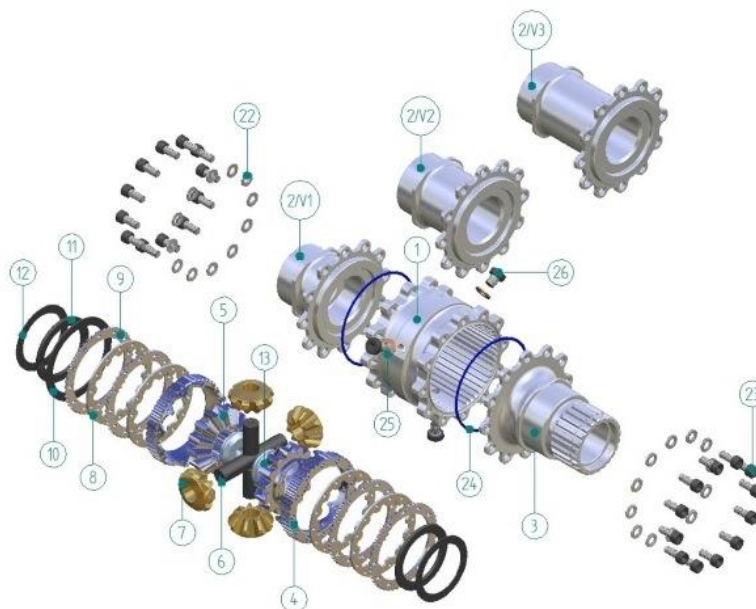
Obrázek 8: Diferenciál s viskózní spojkou [9]

Děrované lamely s vnějším ozubením (2) jsou spojeny se skříní (3), zatímco rozříznuté lamely s vnitřním ozubením (1) jsou spojeny s nábojem výstupního (hnacího) hřídele kol (4). Při pohonu skříně jsou unášeny lamely s vnějším ozubením, tedy mezi lamelami s vnějším a vnitřním ozubením vzniká smyk, tzn. dojde k odtržení silikonové kapaliny, která ulpívá na lamelách. Viskozita silikonového oleje je tak velká, že při větších rozdílech otáček jsou silikonovým olejem unášeny lamely s vnitřním ozubením. Se vzrůstající teplotou a tlakem se zvyšuje viskozita a tím pevnost ve smyku, takže dojde až k téměř 100% uzavíracímu účinku. [9]

1.2.9 Diferenciál Drexler LSD v2010

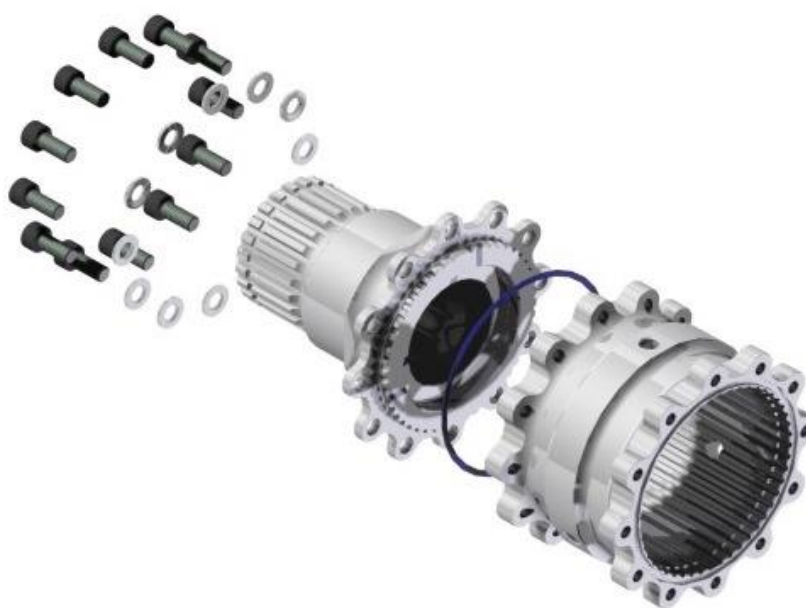
Instrukce k montáži:

Při sestavování diferenciálu se všechny funkčně důležité rozměry změří a zapíší. Je nezbytné, aby jednotlivé lamely zůstaly ve stejném pořadí jako při prvním sestavení a nedošlo k záměně jejich pozic.



Obrázek 9: Díly diferenciálu Drexler LSD v2010 [16]

Nejprve je sestaveno tělo diferenciálu (díl č. 1), O-kroužek (díl č. 24) a víko (díl č. 2) pomocí 12 šroubů s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem M6x14 a plochých podložek (díl 22).



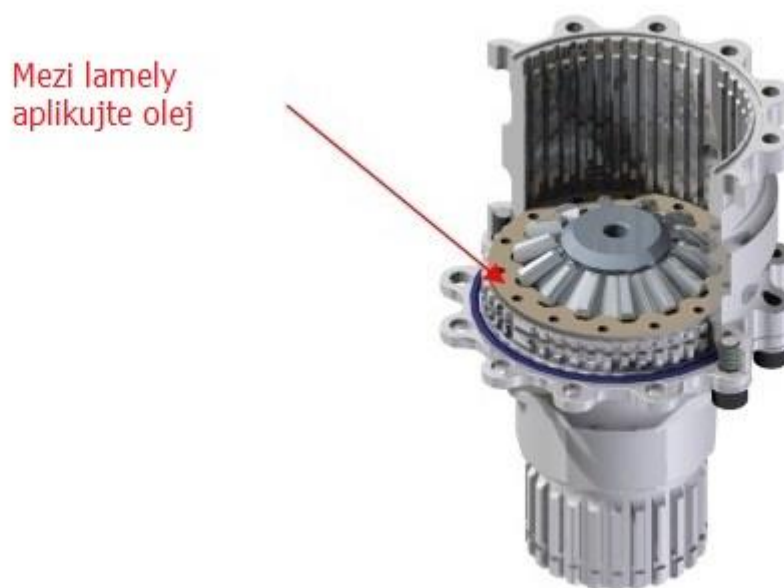
Obrázek 10: První krok sestavení diferenciálu Drexler LSD v2010 [16]

Vložte talířovou pružinu (díl č. 12) a opěrnou podložku (díl č. 11) do určeného otvoru a nezapomeňte na všechny plochy aplikovat mazací olej.



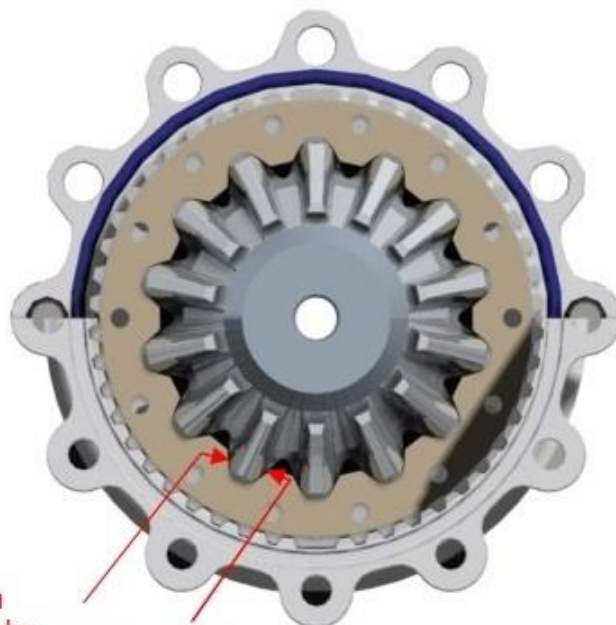
Obrázek 11: Vložení pružiny [16]

Dále vložte balík skládající ze dvou lamel s vnějším drážkováním (díl č. 9) a s vnitřním drážkováním (díl č. 8) a aplikujte mezi ně mazací olej.



Obrázek 12: Vložení lamel [16]

Vložte boční kuželové kolo spolu se zástrčkou do vnitřního drážkování lamely a správně ho natočte.

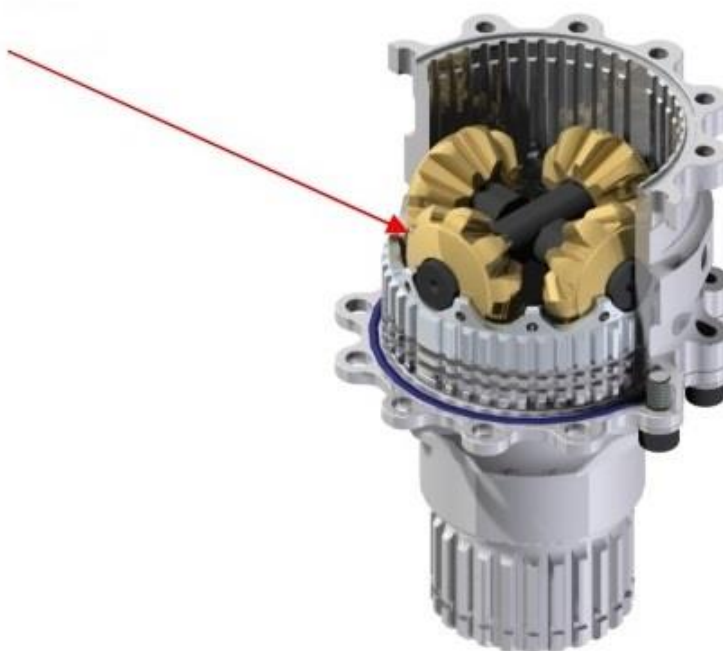


Dávejte pozor na srovnání boku zubu

Obrázek 13: Vložení bočního kuželového kola do drážkování lamel [16]

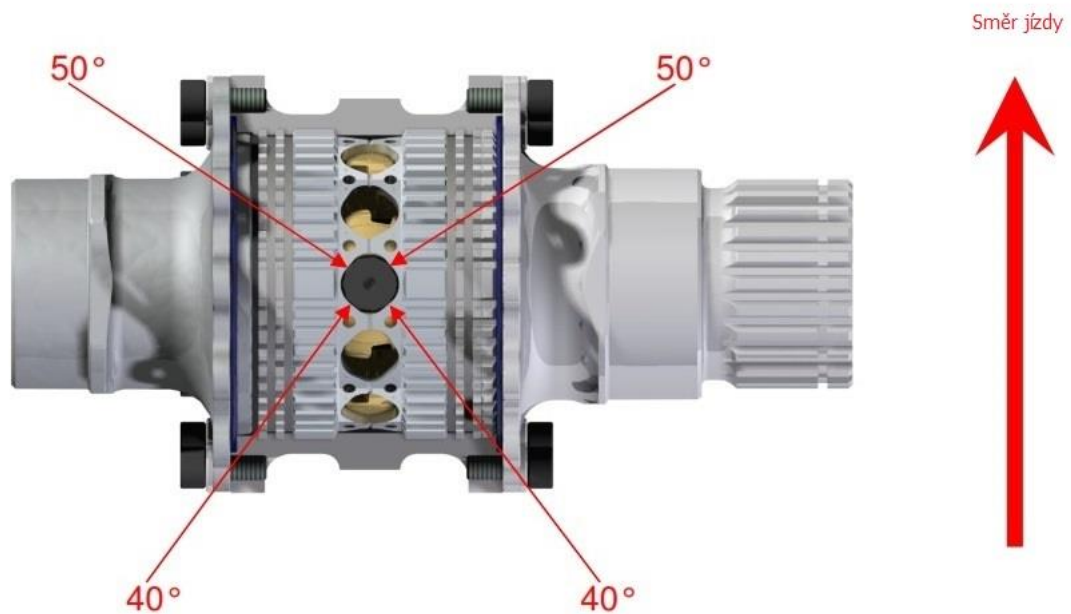
Dále složte kříž (díl č. 6) s kuželovými koly-satelity (díl č. 7) a vložte do kruhové rampy (díl č. 4). Dbejte na dostatek oleje mezi křížem a kuželovými koly. Rampy mají tři možnosti nastavení úhlů v klínové drážce. První možnost (při pohonu na pravé straně) nastavení je 40°/50° (ve směru zrychlování/zpomalování). Druhá možnost je

Aplikujte olej!



Obrázek 14: Vložení kříže s kuželovými koly-satelity [16]

45°/60° a třetí je 30°/45°. Pro změnu nastavení se musí kříž pootočit do příslušné pozice, což je označeno na kruhové rampě. Dále je možné získat další tři nastavení vzájemným prohozením ramp s lamelami, což vede k záměně úhlů pro zrychlování a zpomalování.



Obrázek 15: Klínové drážky diferenciálu [16]

Na těle diferenciálu jsou umístěny tři otvory, ve kterých jsou tři šrouby s vnitřním šestihranem (díl č. 26) s měděnými podložkami (díl č. 25). Ty jsou určeny k plnění mazacím olejem bez nutnosti kompletní kontroly a zároveň slouží k provzdušnění systému při plnění nebo vyprazdňování diferenciálu. Po každém delším testování nebo závodě by měl být diferenciál otevřen a vyčištěn. Při montování přírub by měly být šrouby dotaženy momentem 25 Nm. Při revizi nebo úpravě nastavení diferenciálu je nutné, aby jednotlivé lamely zůstaly ve stejném pořadí, v jakém byly při prvním sestavení.

Možné dosažení svornosti podle úhlu klínové drážky v procentech:

30° → 88 %

40° → 60 %

45° → 51 %

50° → 42 %

60° → 29 %

[16]

1.3 Typy diferenciálů používaných dalšími týmy v soutěži Formula Student

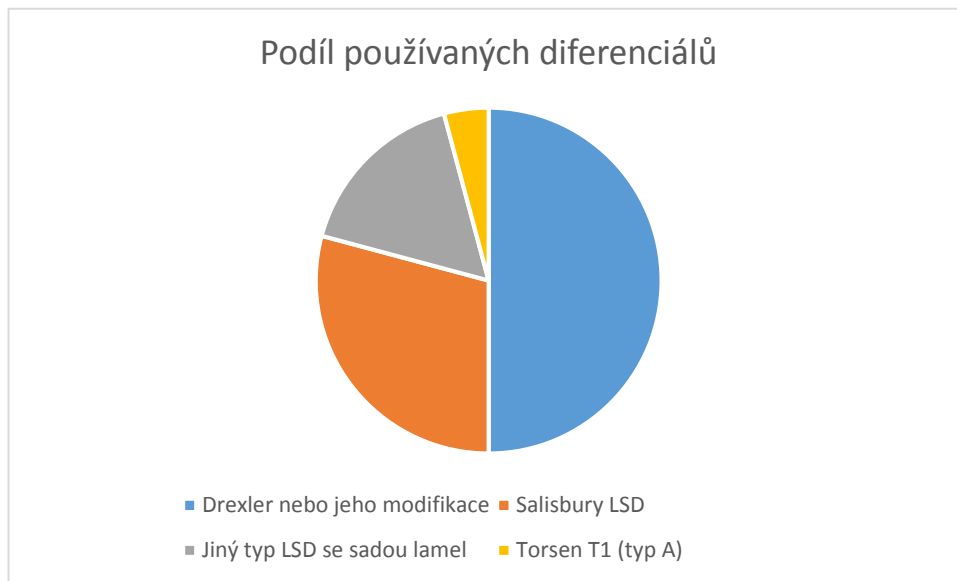
Zde uvedu seznam dvaceti úspěšných týmů v soutěži Formula Student Germany v roce 2014 a typy diferenciálů, které používají.

Týmy:	Typ používaného diferenciálu:
• Corvallis OSU	modifikovaný Drexler
• Stuttgart U	modifikovaný Drexler
• Göteborg Chalmers	LSD (clutch type)
• Erlangen U	LSD vlastní výroby
• Prague CTU	Drexler v2010
• Seattle U Washington	Salisbury LSD
• Coburg UAS	LSD s 30 Nm pružinou pro předpětí
• Weingarten UAS	Drexler
• Pomona CSU	Torsen T1 (typ A)
• Geißen UAS THM	Drexler
• München UAS	Drexler
• Thessaloniki U	Drexler v2010
• Karlsruhe UAS	LSD s 10 Nm pružinou pro předpětí, TBR 2,3
• Glasgow U Strath	Drexler
• Lund U	Drexler, Salisbury LSD
• Kempten UAS	Salisbury LSD
• Kassel U	Drexler
• Melbourne Monash	Drexler s 25 Nm pružinou pro předpětí
• Graz TU	Drexler
• Padova U	LSD s 15 Nm pružinou pro předpětí

Poznámka: LSD = s omezeným prokluzem
Clutch type = se sadou lamel

[15]

Grafické znázornění podílu použití diferenciálů Drexler, Torsen a ostatních v soutěži Formula Student Germany.

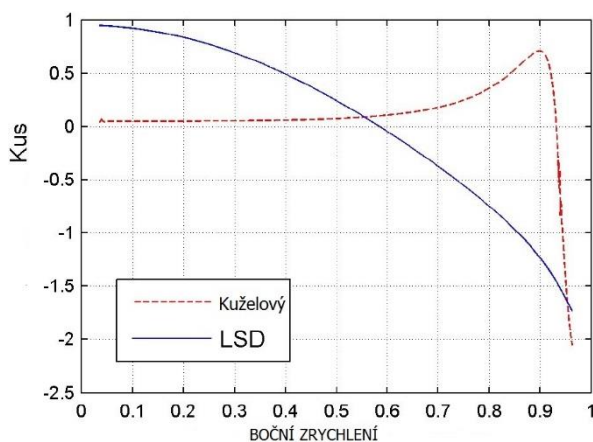


Graf 1: Podíl použití diferenciálů v soutěži Formula Student

2. Vliv diferenciálu na jízdní vlastnosti

2.1 Vliv kuželového diferenciálu

Tento typ diferenciálu nemůže přenést více točivého momentu na jedno kolo než na druhé, takže efekt nedotáčivosti nebo naopak přetáčivosti příliš neovlivní. Ovšem se stoupajícím bočním zrychlením (okolo 0,5 g) začne nejprve docházet k nedotáčivému efektu, později okolo 0,9 g naopak k přetáčivému.



Obrázek 16: Srovnání vlivu kuželového a LSD diferenciálu [11]

$$K_{us} = \frac{d\delta}{da_y} - g \cdot \frac{1}{u^2}$$

K_{us} je nedotáčivý gradient a je definován jako rozdíl mezi aktuálním úhlem zatáčení a kinematickým úhlem při daném bočním zrychlení. Mezi hodnotami od 0 do 1 dochází k nedotáčivému efektu a mezi hodnotami od 0 do -2,5 naopak k přetáčivému efektu.

- δ je úhel zatáčení v [rad]
 - a_y je boční zrychlení v [g]
 - g je gravitační zrychlení
 - l je rozvor v [m]
 - u je podélná rychlost v [m/s]
- [11]

2.2 Vliv uzavřeného diferenciálu

Je dobře známo, že uzavřený diferenciál působí proti zatáčení vozidla, což způsobuje nedotáčivý efekt.

Při průjezdu zatáčkou se vnitřní kolo musí otáčet pomaleji než vnější. Uzávěr diferenciálu však způsobí, že se obě kola musí točit stejně rychle, proto se musí buď vnitřní kolo smýkat a otáčet rychleji než by mělo, nebo se musí vnější kolo smýkat a otáčet pomaleji než by mělo. Popřípadě může dojít ke kombinaci obou těchto případů. Všechny tyto případy vyvolávají nedotáčivost. Při dostatečně velké rychlosti v zatáčce, kdy dochází díky významnému bočnímu zrychlení k přenosu hmotnosti z vnitřního kola na vnější, může vnější kolo přenést větší točivý moment než vnitřní díky většímu zatížení, což vyvolává naopak přetáčivý efekt. Zároveň dochází k odlehčení vnitřního kola, což přetáčivému efektu ještě přidává. [12]

2.3 Vliv diferenciálu typu Limited slip

Vliv tohoto typu diferenciálu se mění hlavně v závislosti na podélném zrychlení. Čím prudší akcelerace nebo zpomalení, tím větší svornosti diferenciál dosáhne v důsledku většího stlačení jednotlivých lamel. Diferenciál má předem určenou teoretickou maximální hodnotu svornosti, které může dosáhnout. Té dosáhne při maximálním možném zrychlení a největší efekt bude mít při velkém bočním zrychlení, které způsobí velké rozdíly v zatížení kol. Nedotáčivost a přetáčivost tedy závisí na bočním zrychlení. Z výše uvedeného grafu této závislosti je patrné, že se vůz s diferenciálem LSD z počátku chová jako nedotáčivý, ale se zvětšujícím se bočním zrychlením se začíná chovat spíše jako přetáčivý. Tato změna nastává přibližně při 0,5 g bočního zrychlení. Například při použití diferenciálu Drexler LSD s vysokou svorností (teoretická maximální hodnota svornosti 88%) při průjezdu zatáčky s velkým podélným zrychlením, které způsobí uzavírání diferenciálu a velkým bočním zrychlením by mělo docházet k podobnému přetáčivému efektu jako v případě uzavřeného diferenciálu. Svým chováním se však bude pouze blížit uzavřenému typu a nikdy nedojde ke stejným otáčkám obou kol při průjezdu zatáčkou. [11]

2.4 Vliv diferenciálu Torsen

Tento typ má svornost danou geometrií ozubení. Svornost se proto nemění v závislosti na podélném zrychlení, ale zůstává pořád stejná. V případě nižších hodnot svornosti se diferenciál bude chováním blížit kuželovému, v případě vyšších hodnot se bude blížit naopak uzavřenému diferenciálu s tím rozdílem, že stejně jako v případě Drexleru nikdy nedojde při průjezdu zatáčkou ke stejným otáčkám vnitřního a vnějšího kola.

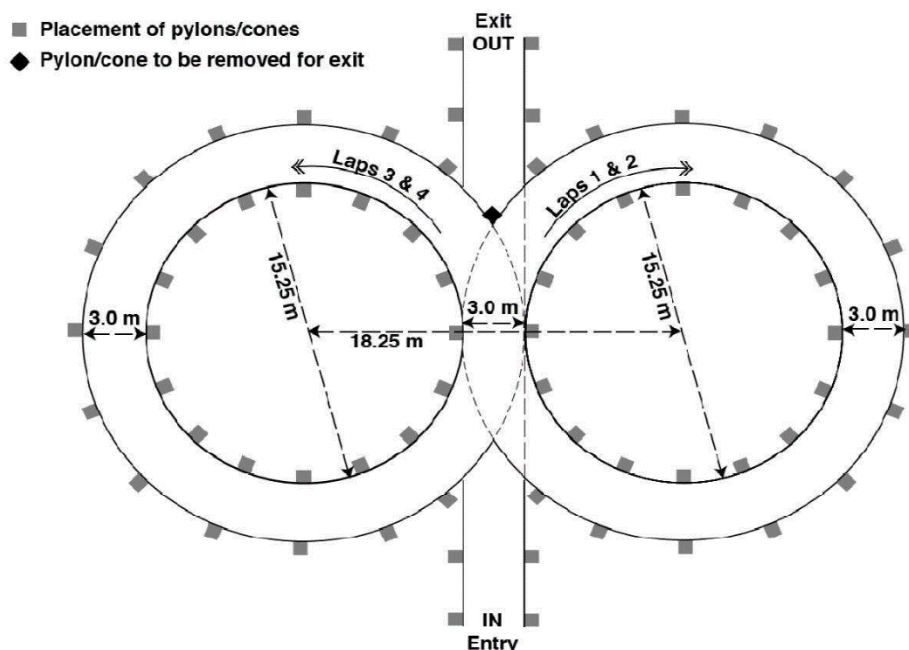
3. Dynamické disciplíny

3.1 Akcelerace

- disciplína se jede na rovné přímé trati
- délka tratě je 75 m, startuje se 0,3 m před startovní čarou
- není dovoleno zvyšovat přilnavost přísadami do pneumatik
- není dovoleno zvyšovat přilnavost protáčením a zahříváním pneumatik
- za každý poražený, nebo posunutý kužel znamená trest 2 s
- vyjetí mimo trať= diskvalifikace

3.2 Jízda v osmičce

- disciplína se jede dle obr. 5
- první a druhé kolo se jede na pravé půlce osmičky, třetí a čtvrté na levé půlce osmičky
- měření je pouze druhé a čtvrté kolo
- výsledný čas je průměrný mezi časy průjezdu 2. a 4. kolem
- za každý poražený, nebo posunutý kužel znamená trest 0,25 s vyjetí mimo trať= diskvalifikace [2]



Obrázek 17: Schéma jízdy v osmičce (SKID-PAD) [2]

4. Návrh postupu měření svornosti diferenciálu Drexler LSD v2010

Při měření svornosti bude důležité vědět hmotnost a rozložení hmotnosti mezi přední a zadní nápravou.

Hmotnost vozu FS.05: 216 kg

(bez pilota)

Rozložení hmotnosti: 45:55%

(přední:zadní náprava) [10]

Pro měření svornosti diferenciálu je nevhodnější znát točivé momenty, které přenáší každé kolo zvlášť. Proto bych při měření svornosti diferenciálu postupoval následovně:

Vozidlo bych umístil zadními koly na dvě válcové brzdy tak, aby každé kolo roztáčelo vlastní válec. Aby diferenciál začal rozdělovat točivé momenty nerovnoměrně, je nutné, aby byla kola rozdílně zatížena normálovým zatížením nebo aby se lišil součinitel tření pod oběma koly. V první části návrhu měření se budu zabývat variantou s rozdílným normálovým zatížením kol, což se při skutečné jízdě děje při bočním zrychlení. Rozdílné zatížení bych simuloval pomocí nadlehčování jednoho z kol pomocí zvedáků o předem vypočítanou hodnotu odlehčení vycházející z reálných hodnot rozložení hmotnosti při konkrétních hodnotách dosaženého bočního zrychlení. Zároveň bych simuloval narůstající zatížení druhého kola také o předem vypočítanou hodnotu zatížení. S postupným nadlehčováním jednoho z kol bude klesat přenášený točivý moment na nadlehčovaném kole a zároveň bude stoupat přenášený moment na kole se stoupajícím zatížením. Při výpočtu svornosti bych vycházel ze skutečnosti, že při poměru zatížení kol například 70/30 by diferenciál s nulovou svorností (například kuželový diferenciál viz kapitola 1.2.1) rozděloval moment vždy rovným dílem, který by se řídil podle momentu, který může být přenášen na méně zatíženém kole. Naopak diferenciál se 100% svorností by rozděloval točivý moment přesně v poměru zatížení kol. Z tohoto intervalu bych poté stanovil, jaké svornosti diferenciál dosahuje.

Dalším způsobem by bylo při simulování různých zatížení úplně zastavit jedno z kol a pouze změřit moment, kterým jsem musel kolo zastavit a moment přenášený na volně otáčejícím se kole. Z jejich poměrů bych již svornost určil stejně jako v předešlém případě.

Druhou možností by bylo neměnit zatížení obou kol, ale povrch, na kterém by kolo zabíralo a tím ovlivnit součinitel tření mezi povrchem a pneumatikou. Ovšem určit přesně součinitel tření by bylo náročné a pravděpodobně i nepřesné, což by velmi ovlivňovalo přesnost měření. Svornost diferenciálu bych opět určil z poměru přenášených točivých momentů, které by korespondovaly s poměrem součinitelů tření.

5. Měření vlivu nastavení svornosti diferenciálu

V rámci tohoto měření proběhlo testování disciplíny Skid-pad (viz kapitola 3.2). První část byla věnována nastavení diferenciálu Drexler na nejnižší možnou svornost a druhá část naopak největší možné svornosti. Byly změřeny časy za jednotlivá kola, zároveň průměrné rychlosti a průměrná boční zrychlení v konkrétním kole. Dále bylo provedeno srovnání dosahovaných výsledků pomocí grafů.

Kola se zatáčením doprava

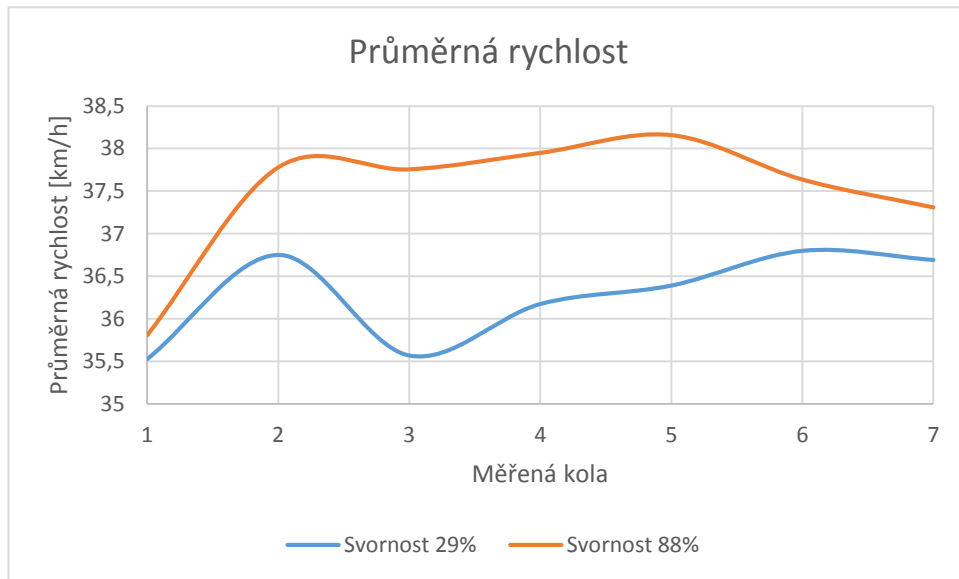
Svornost 29%

kolo	čas [s]	průměrná rychlost [km/h]	průměrné boční zrychlení [g]
1.	5,534	35,525	1,448
2.	5,395	36,750	1,457
2.	5,427	35,567	1,410
4.	5,386	36,173	1,473
5.	5,461	36,390	1,473
6.	5,317	36,798	1,506
7.	5,312	36,691	1,524
Průměrné hodnoty:	5,405	36,271	1,470

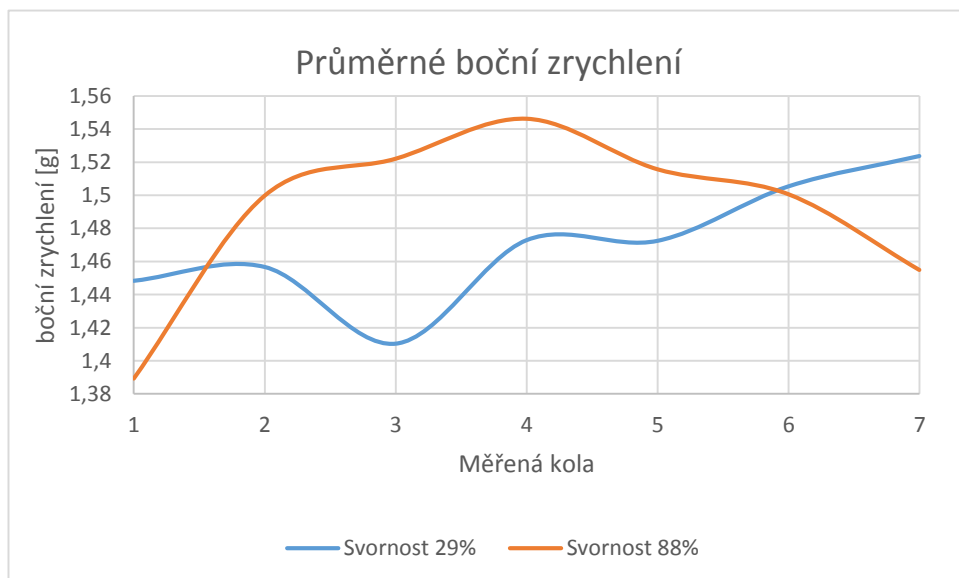
Svornost 88%

kolo	čas [s]	průměrná rychlost [km/h]	průměrné boční zrychlení [g]
1.	5,462	35,807	1,389
2.	5,430	37,779	1,500
3.	5,251	37,755	1,522
4.	5,334	37,949	1,546
5.	5,216	38,158	1,516
6.	5,286	37,636	1,501
7.	5,381	37,308	1,455
Průměrné hodnoty:	5,337	37,485	1,490

Porovnání grafů průměrné rychlosti a průměrného bočního zrychlení s nastavením svornosti na 29% a na 88% při zatáčení doprava.



Graf 2: Průměrná rychlost



Graf 3: Průměrné boční zrychlení

Zhodnocení

Z porovnání výsledků je patrné, že v případě nastavení diferenciálu na svornost 88% bylo dosahováno kratšího průměrného času 5,337 [s], zatímco v případě svornosti 29% bylo dosahováno průměrně 5,405 [s]. Zároveň bylo také v případě svornosti 88% dosahováno vyšší průměrné rychlosti a také většího bočního zrychlení.

Kola se zatáčením doleva

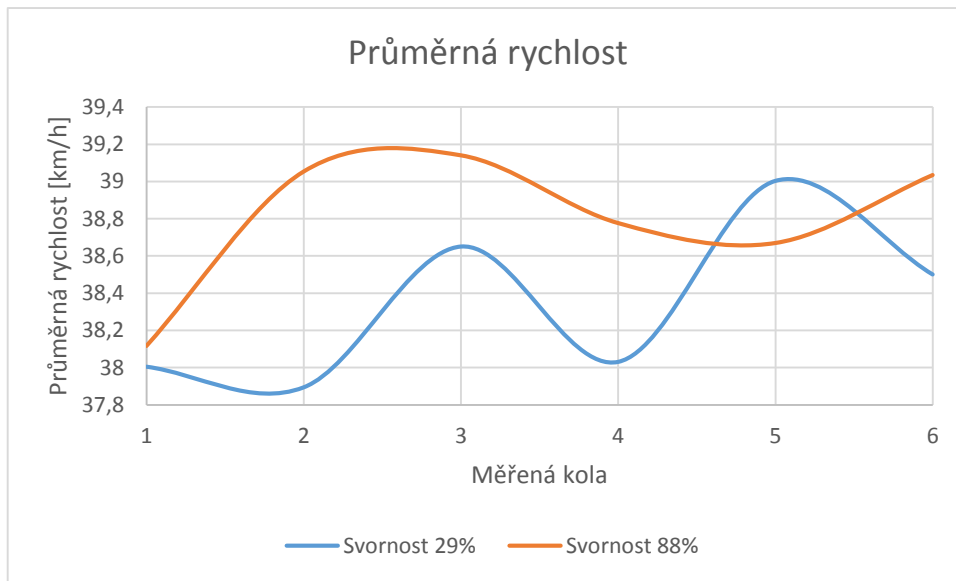
Svornost 29%

kolo	čas [s]	průměrná rychlost [km/h]	průměrné boční zrychlení [g]
1.	5,539	38,005	1,072
2.	5,587	37,894	1,109
3.	5,461	38,651	1,147
4.	5,441	38,031	1,109
5.	5,430	39,004	1,111
6.	5,371	38,501	1,148
Průměrné hodnoty:	5,472	38,348	1,116

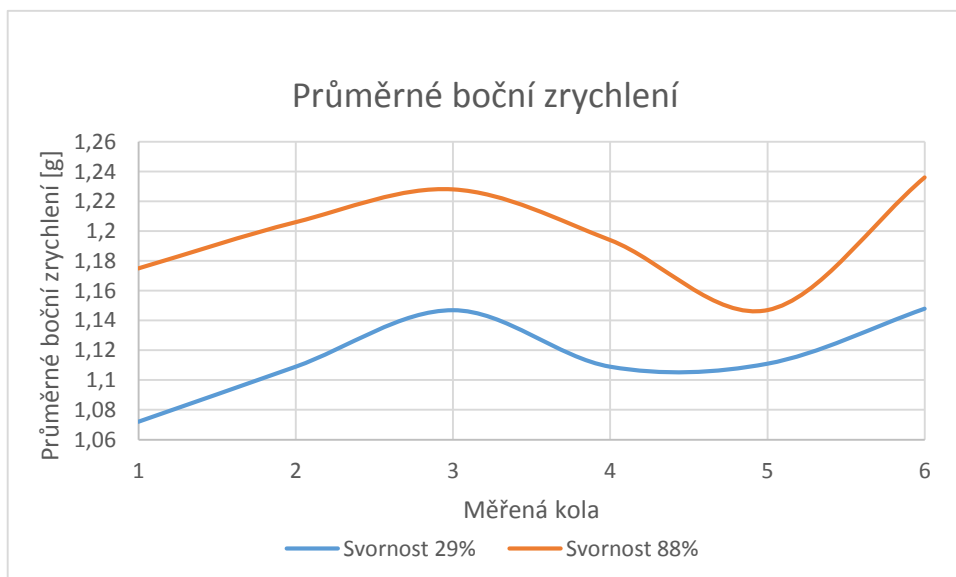
Svornost 88%

kolo	čas [s]	průměrná rychlost [km/h]	průměrné boční zrychlení [g]
1.	5,428	38,117	1,175
2.	5,386	39,054	1,206
3.	5,299	39,141	1,228
4.	5,429	38,777	1,194
5.	5,409	38,670	1,147
6.	5,308	39,035	1,236
Průměrné hodnoty:	5,377	38,799	1,198

Porovnání grafů průměrné rychlosti a průměrného bočního zrychlení s nastavením svornosti na 29% a na 88% při zatáčení doleva.



Graf 5: Průměrná rychlost



Graf 4: Průměrné boční zrychlení

Zhodnocení

Z porovnání výsledků je opět patrné, že v případě nastavení diferenciálu na svornost 88% bylo dosahováno kratšího průměrného času 5,337 [s], zatímco v případě svornosti 29% bylo dosahováno průměrně 5,472 [s]. Zároveň bylo také v případě svornosti 88% opět dosahováno vyšší průměrné rychlosti a také většího bočního zrychlení. Ze vzájemného srovnání pravých a levých kol je patrné, že v pravých kolech bylo dosahováno vyšších hodnot bočního zrychlení, zároveň však nižších rychlostí v kombinaci se srovnatelnými časy. Z toho lze usoudit, že pilot

v případě pravých kol jezdil pravděpodobně blíže vnitřku vyznačené trati, než v případě levých kol. Za těmito rozdíly mezi pravými a levými koly může být nesymetričnost geometrie, různě opotřebované pneumatiky, nebo také mírný náklon testovací plochy na Strahově.

Také z pohledu pilota bylo zaznamenáno, že v případě vyšší svornosti se formule FS.05 příjemněji řídí a především na hranici ztráty trakce je lépe předvídatelné její chování.

V rámci tohoto měření měla být změřena minimální dosažitelná svornost diferenciálu ve voze FS.05, ale z důvodu nedostatečného technického vybavení dílny týmu měření nebylo provedeno. Kdybych nebyl limitován technickým vybavením, postupoval bych dle návrhu postupu měření svornosti viz kapitola 4.

Závěr

V první části této práce bylo cílem seznámit se s konstrukčními rozdíly, vlastnostmi a využitím různých typů diferenciálů. Dalším cílem bylo otestovat jízdní vlastnosti formule FS.05 v disciplíně Skid-pad s minimálním a maximálním nastavením svornosti diferenciálu Drexler a zhodnotit výhody a nevýhody použití obou dvou variant pro soutěž Formula Student. Z výsledků měření vyplývá, že výhodnější variantou je použití diferenciálu s nastavením svornosti na 88%.

Dalším pokračováním této práce by mohlo být například reálné vyzkoušení navrženého postupu měření svornosti diferenciálu.

Literatura a zdroje

[1]VLK, František. Převodová ústrojí motorových vozidel: spojky : převodovky : rozvodovky : diferenciály: hnací hřídele : klouby. 1. vyd. Brno: VLK, 2000, 312 s. ISBN 80-238-5275-2.

[2] FORMULA SAE RULES 2010. Formula sae. 2009, no. 2010, s. 20-45. Dostupný z WWW: <http://students.sae.org/competitions/formulaseries/rules/>

[3] ACHTENOVÁ, Gabriela. PŘEVODOVÁ ÚSTROJÍ MOTOROVÝCH VOZIDEL: Diferenciály a děliče momentu. PRAHA: ČVUT, 2011, 56 s. ISBN 978-80-01-04855-9.

[4] Matějka R. Vozidla silniční dopravy II. Bratislava: Alfa; 1981.

[5] Petránek J. Ústrojí automobilů. Praha: České vysoké učení technické; 1969.

[6] LearnEngineering.[online]. 22.3.2015 [cit.2015-03-22].

Dostupné z: <http://www.learnengineering.org/>

[7] Citroen BX 1.9 GTi 16V 4x4. Diopan [online]. 1997 [cit. 2015-04-17]. Dostupné z:<http://www.dioipan.cz/citroenbx/diferencial.htm>

[8] T-2. TORSEN TRACTION [online]. 2010 [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: <http://torsen.info/products/T-2.htm>

[9] VLK, F. Převody motorových vozidel 1. vyd. Brno : František Vlk, 2006. 371 s.

ISBN 80-239-6463-1

[10] CTU CARTECH. [online]. [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://cartech.cvut.cz/fs-05/>

[11] Annicchiarico, C. Capitani, R.

Torque Vectoring of a Formula SAE through Semi Active Differential Control

Technical Paper 2014-32-0088 2014 doi:10.4271/2014-32-0088

citation:Annicchiarico, C. and Capitani, R., "Torque Vectoring of a Formula SAE through Semi Active Differential Control," SAE Technical Paper 2014-32-0088, 2014, doi:10.4271/2014-32-0088.

[12] Hopkins, P.

Metz, L.

Oversteer/Understeer Characteristics of a Locked Differential

Technical Paper 942485

1994 doi:10.4271/942485

citation:Hopkins, P. and Metz, L., "Oversteer/Understeer Characteristics of a Locked Differential," SAE Technical Paper 942485, 1994, doi:10.4271/942485.

[13] Kinsey, J.

The Advantages of an Electronically Controlled Limited Slip Differential

Technical Paper 2004-01-0861

2004

doi:10.4271/2004-01-0861

citation:Kinsey, J., "The Advantages of an Electronically Controlled Limited Slip Differential," SAE Technical Paper 2004-01-0861, 2004, doi:10.4271/2004-01-0861.

[14] How Differentials Work. How stuff works. [online]. 3.5.2015 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://auto.howstuffworks.com/differential6.htm>

[15] FSC14 Overall Scoring Results. *Formula Student Germany* [online]. 2014 [cit. 2015-06-08]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/fsc/2014/results/>

[16] Drexler Motorsport Service instruction FS 2010

Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratky

LSD - Limited Slip Differential

TBR - Torque Bias Ratio

Symboly

Označení	Jednotky	Popis
F_l	[N]	síla působící na poloměru levého planetového kola
F_p	[N]	síla působící na poloměru pravého planetového kola
M_l	[Nm]	točivý moment na levém kole
M_p	[Nm]	točivý moment na pravém kole
M_t	[Nm]	hnací moment
M_{Tl}	[Nm]	třecí moment na levém planetovém kole
M_{Tp}	[Nm]	třecí moment na pravém planetovém kole
M_{Ts}	[Nm]	moment na satelitu
n	[min ⁻¹]	otáčky klece diferenciálu
n_e	[min ⁻¹]	otáčky vnějšího kola
n_i	[min ⁻¹]	otáčky vnitřního kola
n_l	[min ⁻¹]	otáčky levého planetového kola
n_p	[min ⁻¹]	otáčky pravého planetového kola
N_l	[N]	normálové zatížení levého kola
N_p	[N]	normálové zatížení pravého kola
r_k	[m]	poloměr kola automobilu
r_{pl}	[m]	poloměr planetového kola
r_s	[m]	poloměr satelitu
μ	[-]	součinitel tření

Seznam příloh

1. PDF verze bakalářské práce
2. Tabulky Excel s hodnotami z testování vlivu svornosti na jízdní vlastnosti vozidla FS.05