VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

DIFERENCIÁLY AUTOMOBILŮ
AUTOMOTIVE DIFFERENTIALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Vít Holeňa
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. Zdeněk Kaplan, CSc.
SUPERVISOR

BRNO 2020

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	**Vít Holeňa**
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce:	**doc. Ing. Zdeněk Kaplan, CSc.**
Akademický rok:	2019/20

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

Diferenciály automobilů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Obsahem závěrečné bakalářské práce je komplexní studium automobilních diferenciálů včetně vlastního kritického hodnocení jednotlivých systémů.

Cíle bakalářské práce:

Ucelený soubor problematiky diferenciálů používaných ve stavbě automobilů.
Samosvorné diferenciály, jejich přednosti nedostatky, konstrukční řešení.
Detailní analýza vybraného samosvorného diferenciálu.
Porovnání používaných systémů.

Seznam doporučené literatury:

KIRCHNER, E. Leistungsübertragung in Fahrzeuggetrieben. Springer Verlag, 2007. ISBN 978-3-5-0-35288-4.

ACHTENOVÁ, G. Převodná ústrojí. Diferenciály a děliče momentu. Vydavatelství ČVUT 2011. ISBN 978-80-01-04855-9.

SVOBODA, J. Hydraulické převody pro vozidla, vydavatelství ČVUT, 2004; ISBN 80-01-03006-7.

JAN, Z., ŽDÁNSKÝ, B., ČUPERA J. Automobily 2, Převodná ústrojí motorových vozidel. Brno, Avid, 2008, ISBN 978-80-87143-04-9.

JAN, Z., ŽDÁNSKÝ, B. Automobily 3, Motory, 8. vydání, Brno, Avid, 2016, ISBN 978-80-87143-37-7.

JAN, Z., ŽDÁNSKÝ, B. Automobily 4, Příslušenství, 4. vydání, Brno, Avid, 2013. ISBN 978-80-871-3-29-2.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce pojednává o diferenciálech automobilů. Cílem bylo vytvořit přehled různých typů diferenciálů, především těch samosvorných. První kapitola se věnuje převodovému ústrojí, kterého je diferenciál součástí. Druhá kapitola je o funkci diferenciálu. V třetí, nejobsáhlejší kapitole je věnována pozornost samosvorným diferenciálům, zvláště však diferenciálům Torsen. Poslední, čtvrtá kapitola je o aktivních diferenciálech a systémech, které nám pomáhají překonávat nedostatky výše zmíněných diferenciálů.

KLÍČOVÁ SLOVA

diferenciál, samosvorný diferenciál, Torsen, aktivní systémy

ABSTRACT

This bachelor thesis is about automotive differentials. The aim of thesis was to create an overview of various types of differentials, primarily self-locking. First chapter is dedicated to transmission of which the differential is a part of. Second chapter is about differential function in general. In third chapter, attention is paid to self-locking differentials, especially to Torsen differentials. Last of all, fourth chapter is about active differentials and systems, which help us to overcome disadvantages of differentials mentioned above.

KEYWORDS

differential, self-locking, LSD, limited-slip-differential, Torsen, active systems

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HOLEŇA, Vít. *Diferenciály automobilů*. Brno, 2020. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124599. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 53 s. Vedoucí práce Zdeněk Kaplan.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 26. června 2020 ……..……..

Vít Holeňa

PODĚKOVÁNÍ

Obrovské poděkování patří mé rodině za podporu během studia i psaní této práce. Děkuji také doc. Ing. Zdeňkovi Kaplanovi, CSc. za vedení této práce a v neposlední řadě také všem pedagogům, kteří nám, studentům, předávali v průběhu studia své znalosti a cenné rady.

OBSAH

Úvod **9**

1 Převodová ústrojí **10**

2 Diferenciál **14**

3 Otevřené diferenciály **16**
3.1 Kuželový diferenciál 17
3.2 Čelní diferenciál 18
3.3 Uzávěrka diferenciálu 19

4 Samosvorné diferenciály **20**
4.1 Diferenciál s kuželovými třecími spojkami 21
4.2 Diferenciál s třecí lamelovou spojkou 22
4.3 Eaton MLocker G80 24
4.4 Diferenciály Torsen 25
4.4.1 Torsen typ A 26
4.4.2 Torsen typ B 30
4.4.3 Torsen typ C 32
4.5 Korunový diferenciál 34
4.6 Viskózní spojka 35

5 Aktivní diferenciály a systémy **36**
5.1 Torque vectoring 36
5.2 Audi quattro 37
5.2.1 Sport differential 39
5.2.2 Quattro ultra 40
5.3 Haldex 41
5.4 BMW xDrive 42

Závěr **45**

Použité informační zdroje **46**

Seznam použitých zkratek a symbolů **51**

ÚVOD

Tato práce se bude zabývat diferenciály automobilů, a to s důrazem na diferenciály samosvorné. Diferenciál je velmi důležité technické řešení, bez kterého by se automobil obešel jen těžko.

Diferenciál patří mezi mechanismy, které spadají do skupiny převodových ústrojí. Může být umístěn na hnané nápravě nebo mezi nápravami. Jak jeho název napovídá, jeho hlavním úkolem rozdělovat točivý moment mezi kola jedné či více náprav a vyrovnávat rozdíly (diference) úhlových rychlostí neboli různé otáčky kol při průjezdu zatáčkou.

V průběhu let i diferenciál ušel kus cesty, co se týče vývoje. Na začátku stal jednoduchý mechanický diferenciál s kuželovými koly, ale pokud bychom se podívali na dnešní způsob „diferencování“, tak už nejde o čistě mechanické řešení, ale spíše o elektronické. To s sebou nese výhody i nevýhody.

Dnes tedy existuje několik typů diferenciálů. Od těch jednoduchých, používaných v běžných osobních automobilech, až po ty složitější, které se objevují ve sportovních, závodních vozech nebo ve vozech s pohonem všech kol.

Úkolem této práce bude seznámit čtenáře s různými typy diferenciálů, popsat jejich funkci a vhodné použití. Důraz bude kladen především na diferenciály Torsen, které jsou zajímavé svou velmi specifickou konstrukcí.

1 PŘEVODOVÁ ÚSTROJÍ

„Převodná ústrojí automobilu jsou všechna ústrojí, která jako celek i jednotlivě spojují motor s hnacími koly vozidla za účelem přenosu točivého momentu nebo jeho přerušování i za účelem změny jeho velikosti nebo smyslu.“ [1]

Tyto ústrojí lze, podle způsobu přenosu momentu a podle účelu, rozdělit na ústrojí [1]:

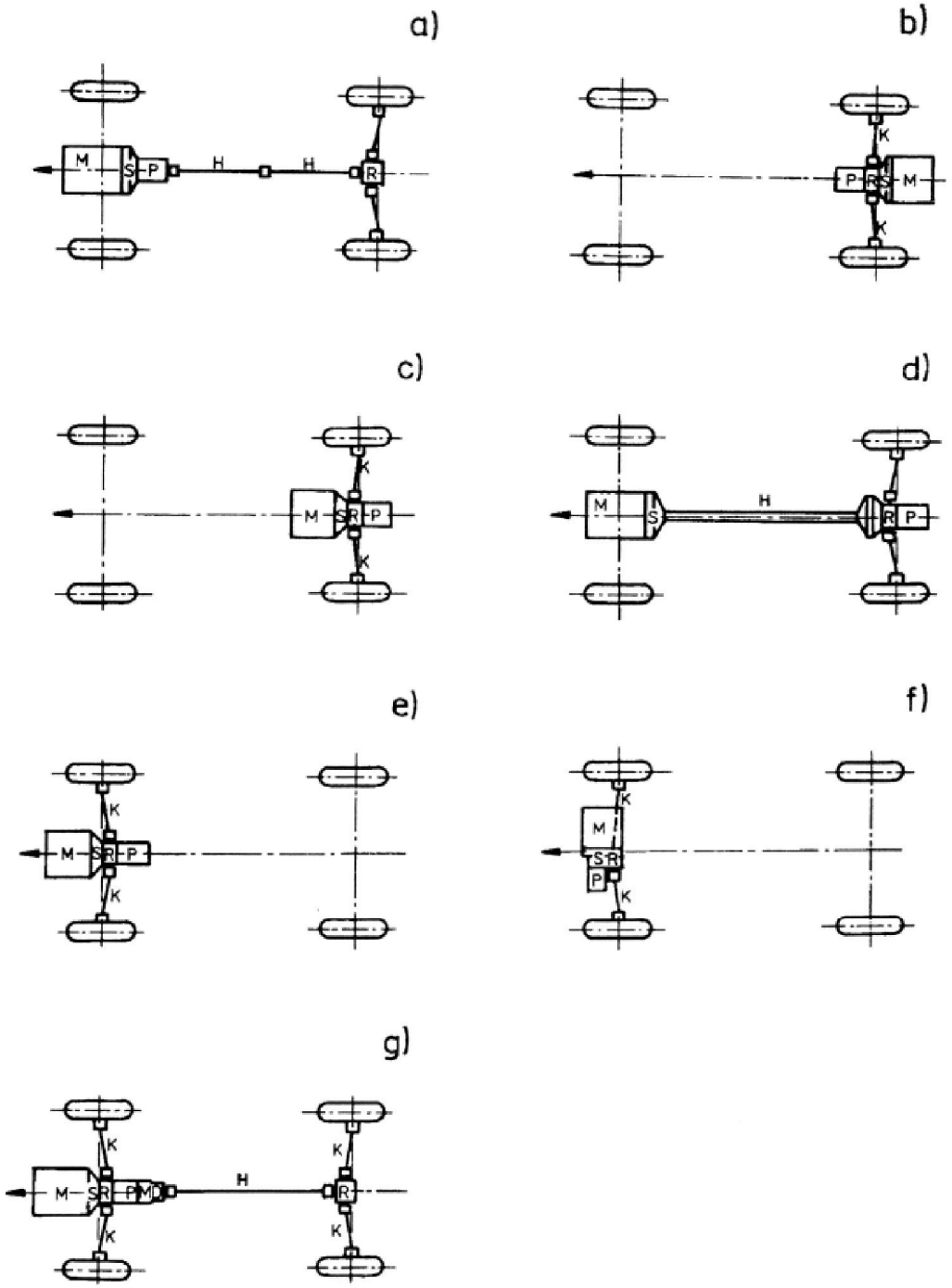
a) pro krátkodobé přerušování točivého momentu
   - spojka
     - slouží k přerušení toku momentu od převodovky, aby bylo možné přeřadit rychlostní stupeň
   - volnoběžka
     - slouží k přenosu toku jen v jednom smyslu otáčení, funguje tedy jako spojka, ale jen v jednom smyslu otáčení

b) pro změnu velikosti přenášeného točivého momentu
   - převodovka
     - umožňuje co nejlépe využít charakteristiku spalovacího motoru tím, že měníme převodový poměr
   - stálý převod
     - převádí otáčky převodovky na otáčky vhodné pro jízdu vozidla

c) pro rozdělení přenášeného točivého momentu
   - rozdělovací převodovka
     - používá se u vozidel s více hnanými nápravami, umožňuje na ně přenášet hnací sílu v různých poměrech
   - diferenciál
     - dělí hnací moment z hnacího na hnané ústrojí a vyrovnává rozdílné úhlové rychlosti kol

Úkolem převodového ústrojí je umožnit co nejefektivnější přenos hnací síly a s tím související hospodárný provoz vozidla, snižovat emise a hluk. Je to tedy poměrně komplikovaná problematika a výzva pro konstruktéry. [1]

V závislosti na tom, jak je uspořádáno hnací, převodové a hnané ústrojí, jsou rozlišovány různé koncepce automobilů [2]:



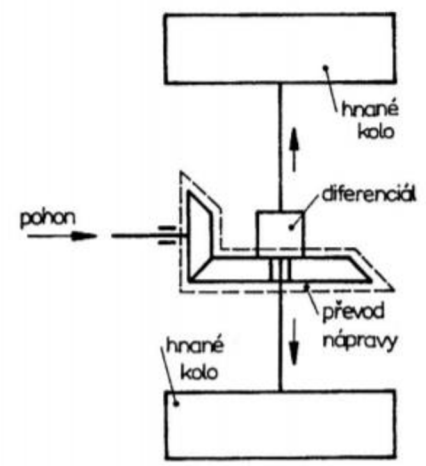
Obr. 1 Uspořádání hnacího ústrojí u osobních automobilů: a) standartní pohon, b) zadní pohon, c) motor mezi nápravami, d) transaxle, e) přední pohon, f) přední pohon s příčně uloženým motorem, g) pohon všech kol [2]

Kde:

P – převodovka, M – motor, S – spojka, K – kardany (poloosy), R – rozvodovka

STÁLÝ PŘEVOD

Stálý převod spolu s diferenciálem tvoří rozvodovku. [2] V obrázku níže je označený jako převod nápravy.



Obr. 2 Schémetické znázornění pohonu nápravy. [2]

Jeho účelem je [2]:

- zvýšení točivého momentu z převodovky
- snížení otáček
- rozvedení na kola hnací nápravy

Zpravidla je řešen jako kuželové soukolí, méně často jako jednoduché soukolí.

U jednostupňových rozvodovek je převodový poměr [2]:

- u osobních automobilů $i_r \approx 3{,}5 \div 4$
- u nákladních automobilů $i_r > 6$

Dvoustupňové rozvodovky se používají jen u těžkých nákladních automobilů a převodový poměr je $i_r = 7$, přičemž se jedná o hodnotu maximální.

Převodový poměr lze obecně vyjádřit jako poměr různých veličin:

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{M_{k2}}{M_{k1}} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{z_2}{z_1} \tag{1.1.1}$$

Kde:

1..... vstup

2..... výstup

n..... otáčky

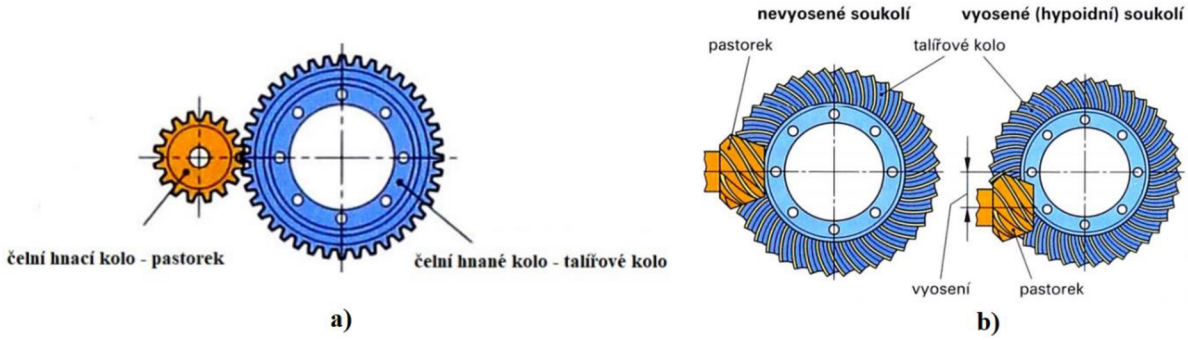
M_k..... točivý moment

d ..... průměr ozubeného kola/pastorku

z ..... počet zubů

Nejčastěji se můžeme setkat s těmito konstrukčními řešeními:

- čelní soukolí (a)
- kuželové soukolí (b)
  - nevyosené soukolí – se zakřivenými zuby
  - vyosené (hypoidní) soukolí – s hypoidními zuby, lze vyosit pastorek až o 0,2.D



Obr. 3 Konstrukční řešení stálého převodu [4]

2 DIFERENCIÁL

Diferenciál je převodový mechanismus, který slouží k rovnoměrnému rozdělení točivého momentu na hnací kola a zároveň musí umožnit rozdílné otáčky hnacích kol. [1] Do diferenciálu vstupuje hnací moment skrze stálý převod a vystupuje z něj dále na poloosy.

Potřebujeme jej zejména v situacích, kdy je potřeba efektivně projet zatáčkou. Při průjezdu každé kolo odvaluje po jiném poloměru, což způsobí rozdílné otáčky kol. Kdyby byla obě kola na stejné hřídeli a byla tedy pevně spojena, tak při průjezdu zatáčkou by se díky stejným otáčkám muselo jedno kolo smýkat. Prokluz zvyšuje opotřebení pneumatik, namáhání převodového ústrojí a zhoršuje boční vedení pneumatiky. Proto je velmi na místě diferenciál použít. [1]

Pokud tedy vozidlo projíždí zatáčkou, platí tyto vztahy [2]:

$$\frac{v_l}{v_t} = \frac{R-\frac{a}{2}}{R} \tag{2.1}$$

$$\frac{v_p}{v_t} = \frac{R+\frac{a}{2}}{R} \tag{2.2}$$

$$\omega_l = \frac{v_l}{r_d} = v_l \cdot \frac{R-\frac{a}{2}}{r_d \cdot R} \tag{2.3}$$

$$\omega_p = \frac{v_p}{r_d} = v_p \cdot \frac{R+\frac{a}{2}}{r_d \cdot R} \tag{2.4}$$

Kde:

R ..... poloměr zatáčky [m]

r_{dyn} ..... poloměr kol [m]

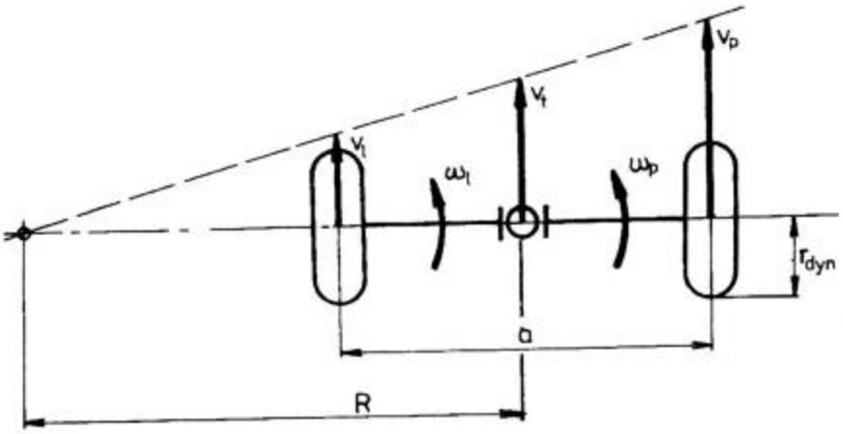
a..... rozchod kol [m]

v_l ..... rychlost levého kola [m.s^{-1}]

v_p..... rychlost pravého kola [m.s^{-1}]

ω_l ..... úhlová rychlost levého kola [rad.s^{-1}]

ω_p ..... úhlová rychlost pravého kola [rad.s^{-1}]



Obr. 4 Činnost diferenciálu při zatáčení automobilu [2]

Diferenciály dělíme podle umístění na:

- nápravové
- mezinápravové – používané pouze u automobilů s pohonem více náprav

Dále je dělíme podle konstrukce na:

- otevřené
- samosvorné
- aktivní

Podle dělení momentu mezi kola nebo nápravy za normálních podmínek*:

- symetrické – moment je rozdělován v poměru 50:50
- asymetrické – moment je rozdělován v jiném poměru než 50:50

*Pozn. – Za normální podmínky se považuje jízda rovně a když kola mají stejnou trakci.

3 OTEVŘENÉ DIFERENCIÁLY

Tyto diferenciály jsou v automobilech ty nejčastěji používané. Jedná se o konstrukčně jednoduché zařízení, které je pro běžného řidiče naprosto dostačující. Moment je vždy rozdělován na levé a pravé kolo v poměru 50:50.

Z tohoto poměru plyne ale jeden zásadní nedostatek. Pokud se jedno kolo dostane na povrch s nízkým součinitelem adheze μ, poklesne i schopnost přenést trakční sílu z obvodu kola na vozovku a tím i točivý moment. V případě otevřeného diferenciálu to znamená, že stejný moment se přenese na druhé kolo s lepší trakcí.

Tuto situaci můžeme popsat vztahy [2]:

$$M_{lmax} = \mu_l \cdot F_l \cdot r_d \tag{3.1}$$

$$M_{pmax} = \mu_p \cdot F_p \cdot r_d \tag{3.2}$$

$$M_{tmax} = M_{lmax} + M_{pmax} \tag{3.3}$$

Kde:

M_{tmax}.....přivedený točivý moment [N.m]

M_{lmax}.....točivý moment na levém kole [N.m]

M_{pmax} .....točivý moment na levém kole [N.m]

μ_l.....součinitel adheze levého kola [-]

μ_p.....součinitel adheze levého kola [-]

F_p.....hnací síla na pravém kole [N]

F_l.....hnací síla na levém kole [N]

r_d.....poloměr kola [m]

Pokud bude platit zjednodušení $F = F_l = F_p$ a $\mu_l < u_p$, pak:

$$M_{lmax} = M_{pmax} = u_l \cdot F \cdot r_d \tag{3.4}$$

$$M_{tmax} = 2 \cdot \mu_l \cdot F_p \cdot r_d \tag{3.5}$$

Z toho plyne, že přenositelný moment se vždy řídí podle menšího momentu.

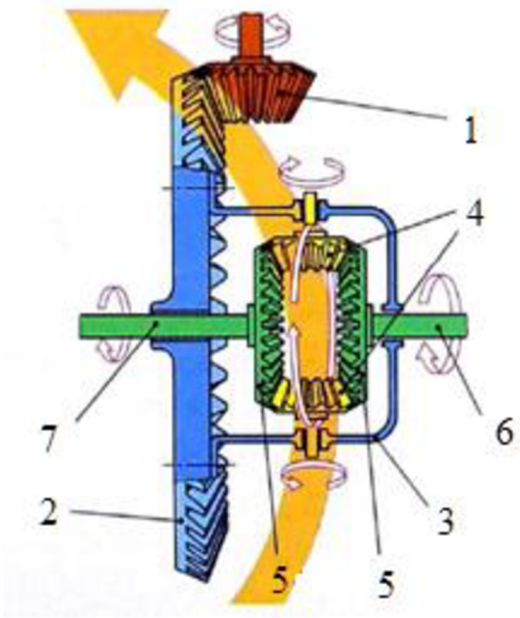
Uvažujme tedy situaci, kdy jedno kolo stojí na povrchu s nízkým koeficientem tření (např. led) a druhé kolo na povrchu s vysokým koeficientem tření (např. asfalt). Kolo na ledě se bude protáčet, zatímco kolo na asfaltu bude v klidu. Přenesený hnací moment na vozovku bude velice malý a auto zůstane stát.

Toto lze řešit u otevřených diferenciálů uzávěrkou. Než o něm však bude řeč, budou nejprve představeny základní typy otevřených diferenciálů.

3.1 KUŽELOVÝ DIFERENCIÁL

Nejčastěji používaným diferenciálem v osobních automobilech je otevřený kuželový diferenciál. Svou kinematikou vychází z planetového soukolí. [2]

Skládá se z pastorku stálého převodu (1), na který je přiváděn hnací moment, talířového kola (2). S talířovým kolem je pevně spojena klec diferenciálu (3), v které jsou otočně umístěny satelity (4). Ty mohou být buď dva po 180° nebo, pro přenos většího momentu, čtyři po 90°. Satelity jsou v záběru s planetovými koly (5) a ta už pak s pravou (6) a levou (7) poloosou. V případě, že auto jede rovně, se satelity kolem své osy neotáčí, pouze jsou unášeny klecí a otáčky obou planetových kol jsou stejné. Pokud ale auto projíždí zatáčkou, jsou úhlové rychlosti kol rozdílné. V našem případě auto zatáčí doleva, což znamená, že pravé (vnější) kolo se bude otáčet rychleji. Rozdílné úhlové rychlosti budou zachycovat právě satelity, které se začnou otáčet i kolem své osy a umožní tak vzájemnou rotaci obou poloos.



Obr. 5 Otevřený kuželový diferenciál [5]

Rotace satelitů také logicky způsobí to, že zatímco jedno planetové kolo se bude točit o Δn otáček rychleji, druhé kolo se bude otáčet o Δn otáček pomaleji (opačným směrem). Pokud pak k výsledným hodnotám přičteme střední otáčky n (otáčky klece), získáme otáčky daných poloos. [3]

Tuto skutečnost lze vyjádřit pomocí rovnic [3]:

pro otáčky vnějšího (externího kola):

$$n_e = n + \Delta n \tag{3.1.1}$$

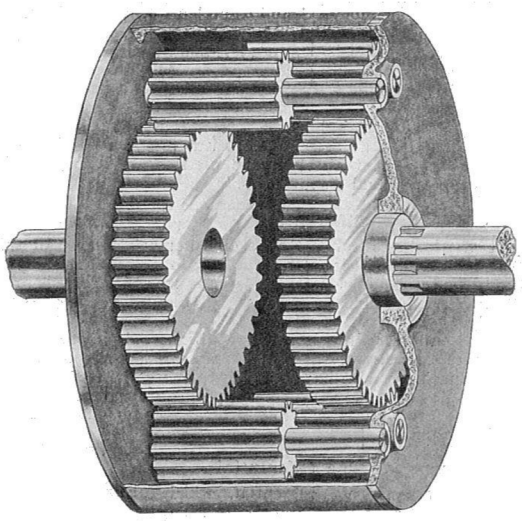
pro otáčky vnitřního (interního kola):

$$n_i = n - \Delta n \tag{3.1.2}$$

3.2 ČELNÍ DIFERENCIÁL

Čelní diferenciál už není řešen pomocí kuželového soukolí, nýbrž pomocí jednoduchého soukolí. V automobilech se vyskytuje jen zřídka. Používá jej především Tatra, která jej ve svých vozech používá dodnes, a to v kombinaci jednoduchým dvoustranným převodem a přesazenými talířovými koly. To znamená, že jsou přesazeny i poloosy (cca 50 mm). [6]

Samotný diferenciál je tvořen klecí diferenciálu a satelity a planetovými koly s přímým ozubením. Točivý moment je přiváděn na klec diferenciálu, v kterém jsou otočně umístěny satelity. Tyto satelity jsou umístěny po dvojicích, které jsou spolu navzájem v záběru, ale zároveň je každý z nich v záběru i s jedním planetovým kolem. Pokud automobil bude projíždět zatáčkou, opět budou platit vztahy platné pro kuželový diferenciál. Tedy, že o kolik se bude točit jedno planetové kolo rychleji, o tolik pomaleji se bude točit kolo druhé. [3]



Obr. 6 Čelní diferenciál [7]

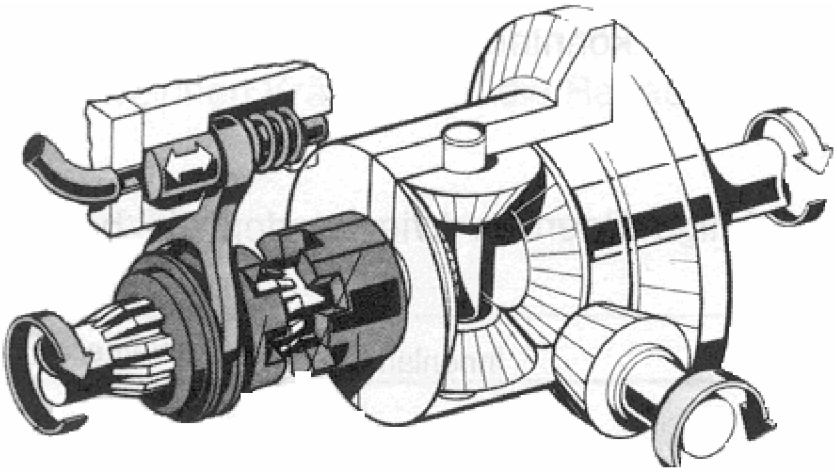
Mezi jeho výhody patří jednoduchost a nulové axiální síly, ale nevýhodou je velká vlastní účinnost diferenciálu, která způsobuje odskakování kol při jízdě a taky se negativně projevuje při jízdě na kluzké vozovce. [2]

3.3 UZÁVĚRKA DIFERENCIÁLU

U těžkých vozidel nebo vozidel, která se používají v těžkém terénu, lze problém související s přenosem momentu při špatné adhezi vyřešit uzávěrkou diferenciálu. Pokud by se jedno kolo dostalo do vzduchu, tak by přenositelný moment na obě kola byl nulový. Mechanická uzávěrka způsobí, že se spojí obě hnací kola nápravy a veškerý hnací moment půjde na kolo, které má trakci. [2]

Většinou se ale ovládá manuálně a řidič jí pak musí věnovat nadbytečnou pozornost, což vede ke zhoršené bezpečnosti jízdy a v případě nevypnutí uzávěrky při běžné jízdě. [2]

Je řešena buď jako zubová spojka nebo přesuvná objímka. [2]



Obr. 7 Uzávěrka diferenciálu se zubovou spojkou [8]

4 SAMOSVORNÉ DIFERENCIÁLY

Běžný řidič si ve svém autě vystačí s otevřeným diferenciálem. Pro automobily, které jsou sportovního až závodního „střihu“ nebo automobily terénní je ale otevřený diferenciál naprosto nevhodný. Jejich nevýhody jsme si už popsali výše. Pro tento účel se vyrábí samosvorné diferenciály (někdy nazývané diferenciály s omezeným prokluzem). Samosvorné se nazývají proto, že se „uzamykají“ samy, reakcí buď na rozdíl otáček, nebo momentů. Nevyžadují tedy žádné vnější manuální ani elektronické ovládání. To ale může znamenat to, že se samy uzamknout i tehdy, kdy to zapotřebí není.

Svornost je taky vykoupena tím, že se vlastní účinnost, jako v případě otevřených diferenciálu, neblíží 100 %. To je způsobeno právě třením, které nám vyvozuje svornost, a tak tedy část výkonu obětujeme na ztráty třením. Ovšem je důležité si uvědomit, že funguje i právě v nepříznivých podmínkách, kde bychom jinak s otevřeným diferenciálem nepřenesli na vozovku žádný výkon.

Svornost vznikající zvýšeným třením lze popsat těmito vztahy, kde M_{Tl}, M_{Tp} a M_{Ts} jsou třecí momenty na levém a pravém planetovém kolem a na satelitu, a kde za předpokladu $n_l > n_p$ platí [2]:

hnací moment:

$$M_t = \left(F_l + F_p\right) \cdot r_{pl} \tag{4.1}$$

moment na levé planetě:

$$F_l \cdot r_{pl} - M_{Tl} = M_l \rightarrow F_l \cdot r_{pl} = M_l + M_l \tag{4.2}$$

moment na pravé planetě:

$$F_p \cdot r_{pl} + M_{Tp} = M_p \rightarrow F_p \cdot r_{pl} = M_p - M_{Tp} \tag{4.3}$$

moment na satelitu:

$$F_p \cdot r_s - M_{Ts} = F_l \cdot r_s \tag{4.4}$$

po rozšíření rovnice o poloměr r_{pl} (poloměr planetového kola):

$$F_p \cdot r_{pl} = F_l \cdot r_{pl} + M_{Ts} \cdot \frac{r_{pl}}{r_s} \tag{4.5}$$

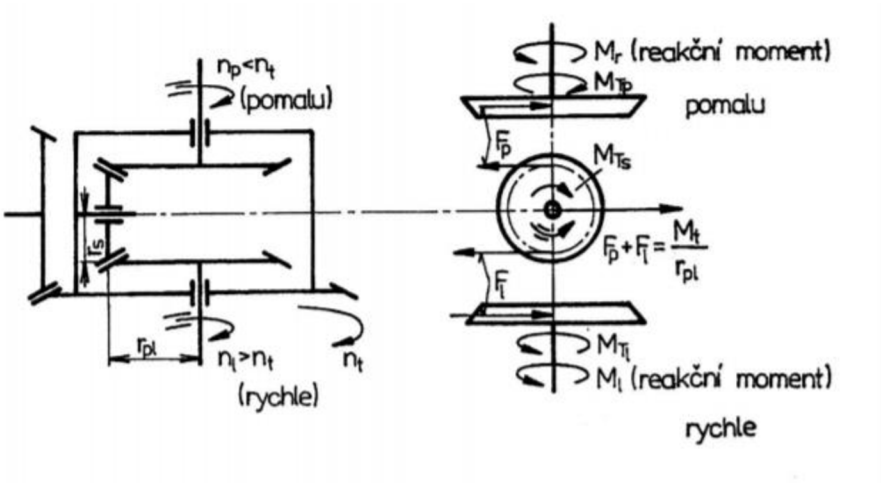
po dosazení výše odvozených vztahů získáme:

$$M_p - M_{Tp} = M_l + M_{Tl} + M_{Ts} \cdot \frac{r_{pl}}{r_s} \tag{4.6}$$

a po konečném vyjádření:

$$M_p = M_l + M_{Tl} + M_{Tp} + M_{Ts} \cdot \frac{r_{pl}}{r_s} \tag{4.7}$$

Z toho vyplývá, že moment na pomalejší hřídeli bude větší než moment na rychlejší hřídeli.



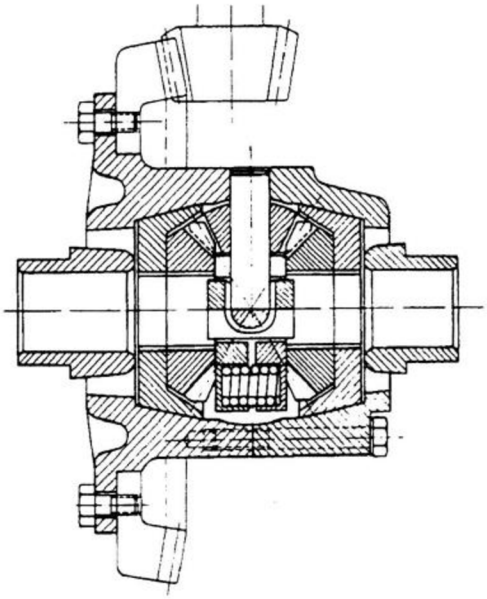
Obr. 8 Kinematické a silové poměry v diferenciálu se zvýšeným třením [2]

Svorný účinek bývá u osobních automobilů zpravidla do 40 % (vlastní účinnost je 60 %). To znamená, že až 20 % točivého momentu (40 % /2) jsme schopni převést z prokluzujícího kola na kolo s lepší trakcí. [1]

Jsou ale náročnější na výrobu, montáž nebo údržbu, proto je jejich cena podstatně vyšší.

4.1 DIFERENCIÁL S KUŽELOVÝMI TŘECÍMI SPOJKAMI

Tento diferenciál je taktéž kuželový. Je však navíc vybaven kuželovými spojkami (mezi klecí a planetovými koly) a rozpěrným elementem (mezi planetovými koly) – dvěma destičkami, které jsou od sebe odtlačovány předepjatými tlačnými pružinami. Toto předpětí spolu s axiálními silami vznikajícími v kuželovém ozubení pak vyvozuje třecí moment, který se vytvoří mezi povrchem destičky a planetovým kolem jedné nebo druhé poloosy. [2]



Obr. 9 Diferenciál Borg Warner [2]

Obr. 10 Přestavbová sada Phantom Grip [9]

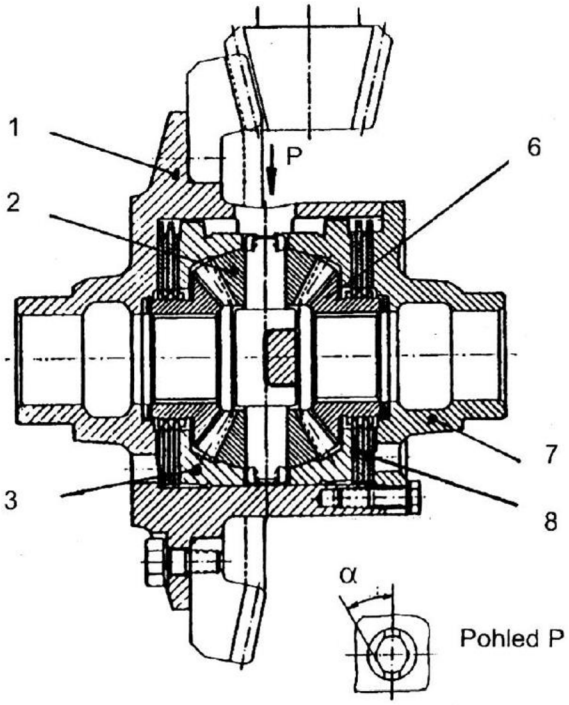
Diferenciál jako celek byl vyráběný v minulosti firmou Borg – Warner.

Lze se s ním ale i setkat bez kuželových spojek, pouze s rozpěrným elementem, a to třeba v přestavbových sadách, které umožní předělat otevřený diferenciál na samosvorný. Mezi takové produkty patří například PhantomGrip. Jeho výrobce slibuje lepší průjezd zatáčkou nebo zlepšení ovladatelnosti. [9] Jedná se o pravděpodobně nejlevnější řešení, pokud chce člověk samosvorný diferenciál. Nevýhodou může být pak zvýšené opotřebení částí jako jsou planetová kola nebo v případě diferenciálu Borg Warner i klece.

4.2 DIFERENCIÁL S TŘECÍ LAMELOVOU SPOJKOU

Je to kuželový diferenciál s modifikací v podobě takové, že v kleci diferenciálu je umístěna ještě jedna, volně otočná klec, v níž jsou teprve umístěny satelity. Tato volně otočná klec má pak z každé strany set spojkových lamel. V situaci, kdy jedno kolo prokluzuje se díky různým mechanismům stlačí lamely, diferenciál se uzamkne a na obě kola je přenášen stejně velký hnací moment.

Točivý moment je přiváděn prostřednictvím talířového kolo na klec (1). Uvnitř klece je ještě vložena jedna, volně otočná klec (3). Teprve v ní jsou umístěny na čepech nasunuté satelity (2). Na každém planetovém kole jsou nasunuty lamely (8) tak, aby byly střídavě na kole a ve vnější kleci. Pokud se jedno kolo začne otáčet rychleji, čepy satelitů v drážce se v klínové drážce posunou po zkosení. Tento tvarový styk způsobí, že se vložená klec (3) rozšíří do stran a stlačí lamely (8) k sobě. [2]



Obr. 11 Samosvorný diferenciál Lok-O-Matic [2]

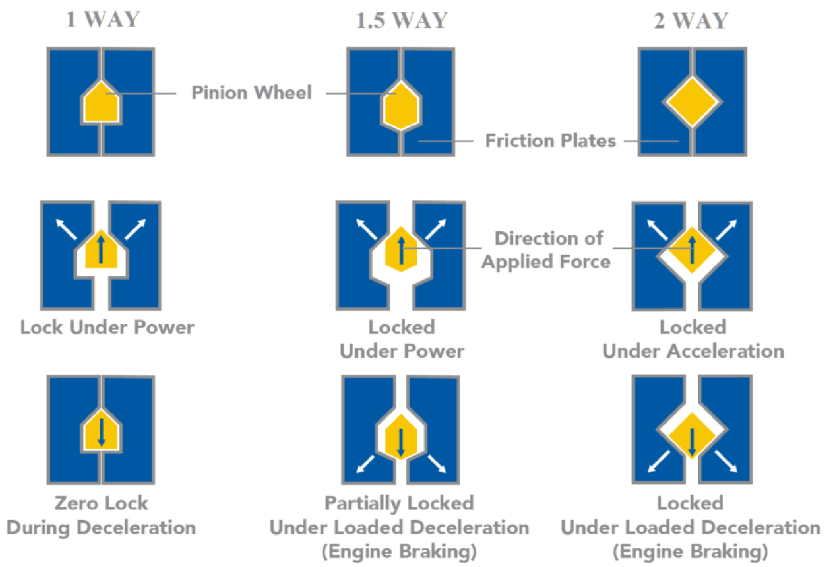
Ke stlačování lamel dochází vlivem axiálních sil v kuželovém soukolí, díky rozšiřování vnitřní klece a popřípadě díky talířovým pružinám. [10]

V závislosti na tloušťce lamel a jejich uspořádání, lze měnit součinitel tření. Jako poslední „lamela“ se dává talířová pružina, která vyvozuje předpětí. Diferenciál se zpravidla plní

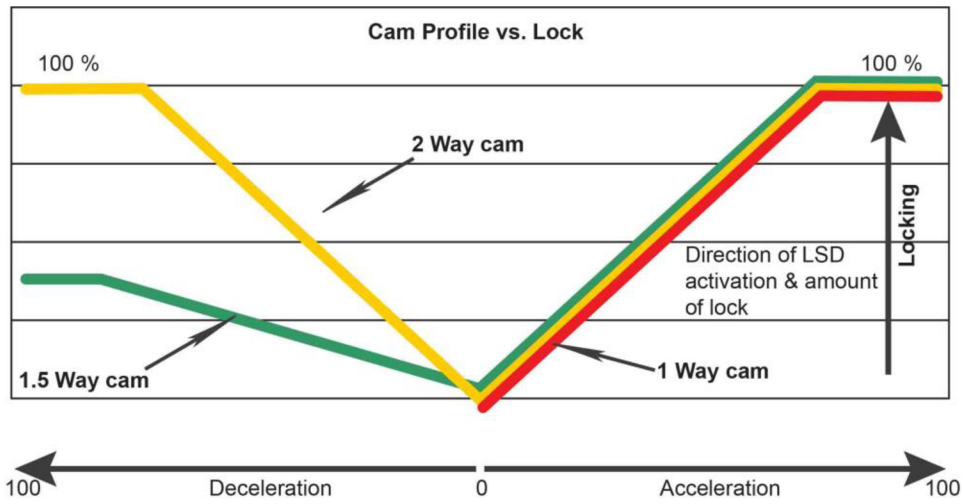
mazivem, které životnost lamel zvyšuje. Ani to však ale nezvrátí fakt, že lamely jsou nejslabší článkem celého mechanismu. Podléhají velkému opotřebení a takový diferenciál není proto vhodný do běžných, ale spíše do sportovních nebo závodních vozů. [10]

Jízdní vlastnosti dále zásadně ovlivňuje úhel rozevření drážky pro čep. Čím je mírnější, tím agresivněji se diferenciál uzamyká. [10] Tyto diferenciály rozdělujeme taky podle tvaru drážky na [11]:

- jednocestný (1-way) - uzamyká se pouze v jednom směru při akceleraci
- částečně dvoucestný (1,5-way) - při deceleraci se uzamyká méně než při akceleraci
- dvoucestný (2-way) - uzamyká se při akceleraci i deceleraci



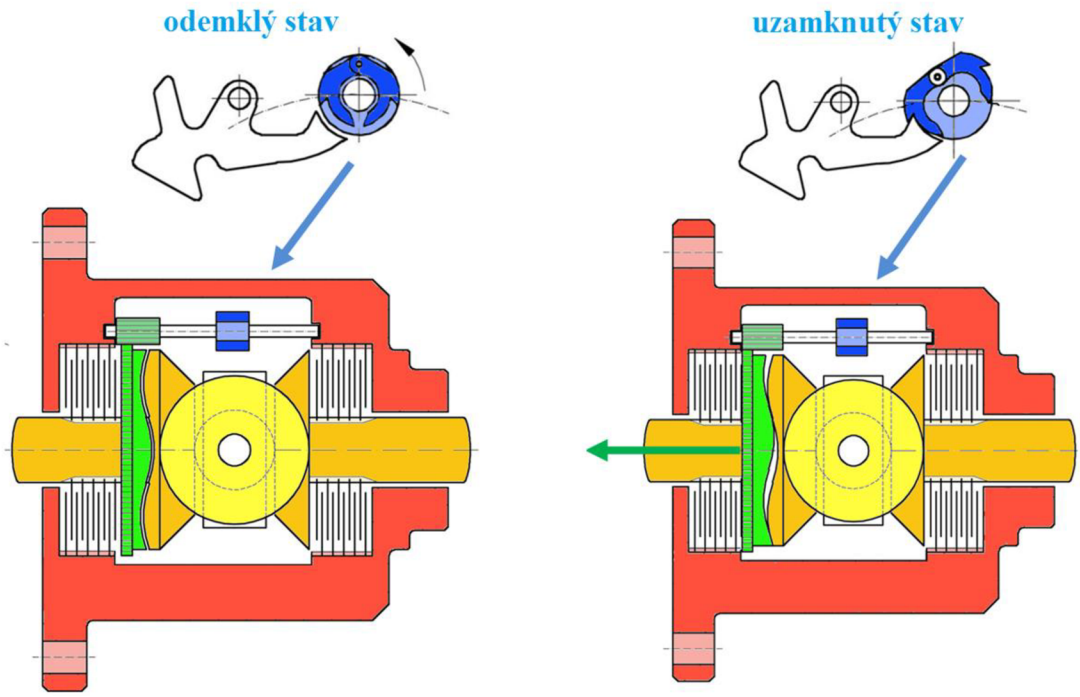
Obr. 12 Typy drážek [12]



Obr. 13 Chování diferenciálu v závislosti na typu drážky [11]

4.3 EATON MLOCKER G80

Tento diferenciál od americké firmy Eaton nabízí zcela jiné řešení toho, jak vyvodit svornost. Je to specifický diferenciál vhodný spíše pouze pro off-roadové terenní vozidla. Vychází částečně z kuželového diferenciálu s lamelovými spojkami. Lamelové spojky ale nejsou stlačovány v důsledku roztlačení klece čepy satelitů, ale vačkovým kotoučem, který je volně nasunut na jednom planetovém kole. V kleci je umístěn odstředivý mechanismus, který je pomocí drážkovaného konce s touto vačkou spojen. [13]



Obr. 14 Princip funkce diferenciálu Eaton MLocker G80 [14]

Za normálních podmínek funguje jako otevřený diferenciál. Když tedy jede auto rovně a žádné kolo se neprotáčí, jsou otáčky klece a jednotlivých kol stejné. Pokud se ale jedno kolo začne otáčet rychleji, rychlosti planetových kol vůči kleci budou rozdílné. U menších rozdílů, které vzniknou třeba při průjezdu zatáčkou, se tento diferenciál chová stále jako otevřený.

U větších rozdílů ($\Delta n > 100\ min^{-1}$) to ale způsobí, že se odstředivý mechanismus roztočí, jeho čelisti se roztáhnou a jedna z nich se zasekne o západku. Tím se odstředivý mechanismus přestane otáčet a s ním se přestane otáčet i vačka, která je s ním spojena. Protáčející planetové kolo se ale vůči ní bude stále točit, takže se vačka vzpříčí a dojde ke stlačení lamel. Otáčky klece a protáčejícího kola se sjednotí a na obě kola bude dodáván moment v poměru 1:1. [15]

Obr. 15 Eaton MLocker G80 [16]

Mezi výhody patří určitě to, že mechanismus funguje zcela samočinně a je kompatibilní se stabilizačními systémy. Nevýhodou je jeho trhané spínání, které může v kombinaci s velkými pneumatikami a velkým zatížením vozidla způsobit až zničení mechanismu. [17]

4.4 DIFERENCIÁLY TORSEN

Diferenciály Torsen mají zcela jiný mechanismus než kuželové diferenciály. Kuželové soukolí je nahrazeno ozubením šnekovým (v případě typu A) nebo čelním ozubením se šikmými koly (typ B nebo C). Název Torsen je odvozen od slov *Torque* (točivý moment) a Sensitive (citlivý). Je to tedy diferenciál citlivý na rozdíl točivých momentů.

Vyrábí se od 80. let 20. století. Dnes práva na jeho výrobu drží společnost JTEKT a Torsen je veden jako ochranná známka. [18] Proslavily se především ať už jako nápravový ve vozech Alfa Romeo, tak ve vozech Audi jako mezinápravový, ale používal se i v řadě dalších automobilů.

Princip spočívá opět v tom, že se cíleně zvyšují ztráty třením v mechanismu. U diferenciálů Torsen je to do značné míry způsobeno šikmým ozubením, v kterém vznikají axiální síly. [19]

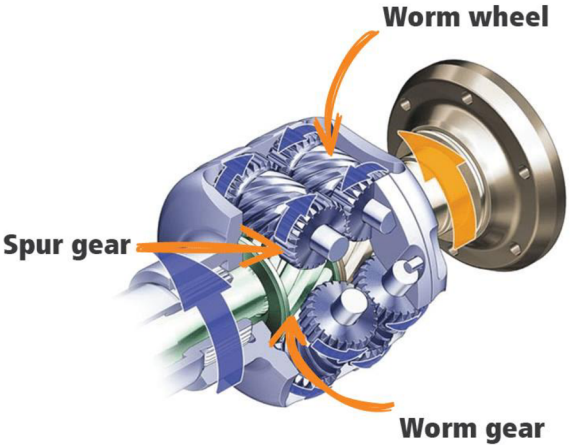
Jejich účinek vystihuje nejlépe veličina TBR – Torque Bias Ratio, což vyjadřuje poměr dělení momentů. Ta vyjadřuje, kolikrát více momentu je diferenciál schopný přenést na kolo s lepší trakcí (v případě, že jednotlivá kola mají různý součinitel adheze) a je tedy jinou interpretací, jak vyjádřit samosvornost. Tato hodnota se navrhuje podle konkrétního využití diferenciálu a v průběhu životnosti se nemění. Může nabývat hodnot od 2,5:1 až do 5:1. Čím je větší, tím agresivněji se diferenciál chová. [19]

Problém u těchto diferenciálů nastává v momentě, kdy se jedno kolo dostane do vzduchu. Diferenciály typu Torsen musí být pod zatížením z obou stran, jinými slovy musí na každém kole vznikat nenulový reakční moment od vozovky. Pokud to není zajištěno, Torsen se chová jako otevřený diferenciál. [20]

Jelikož není snadné pochopit, jak tyto diferenciály fungují, bude jim v této práci věnována největší pozornost.

4.4.1 TORSEN TYP A

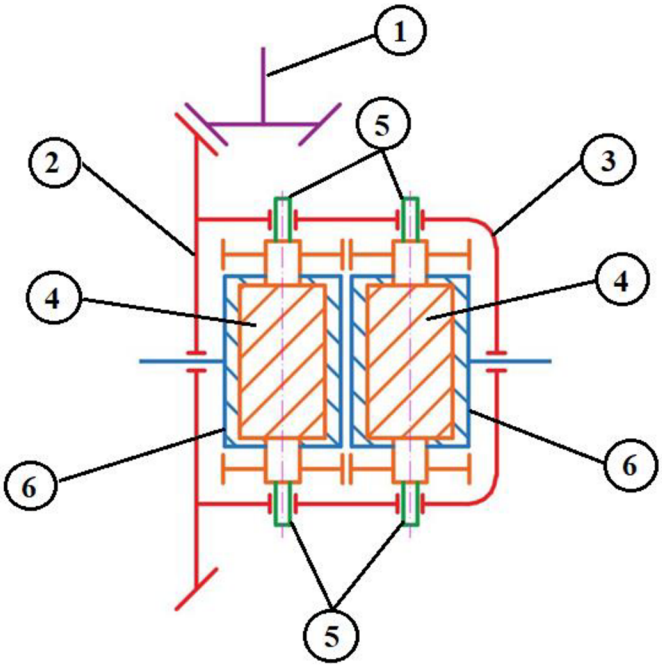
Torsen typ A je kombinací přímého ozubení (spur gear), šnekových kol (worm wheels) a šneků (worm gears). Jde o diferenciál se symetrickým dělením momentu a používá se nejčastěji buď jako diferenciál zadní nápravy nebo jako mezinápravový. [20]



Obr. 16 Řez mezinápravovým diferenciálem Torsen typ A [20]

PRINCIP FUNKCE

Pomocí pastorku stálého převodu (1) je na talířové kolo (2) přiváděn hnací moment, poté na klec (3), která unáší šneková kola (4) otočně umístěná na čepech (5). Šneková kola roztáčí šneky (6), které jsou spojeny s poloosami. Šnekových kol je zde celkem šest, jsou umístěny po dvojicích po 120°, přičemž každá dvojice je spolu spojena ještě čelním přímým ozubením. Tím vytváří vazbu mezi oběma poloosami.

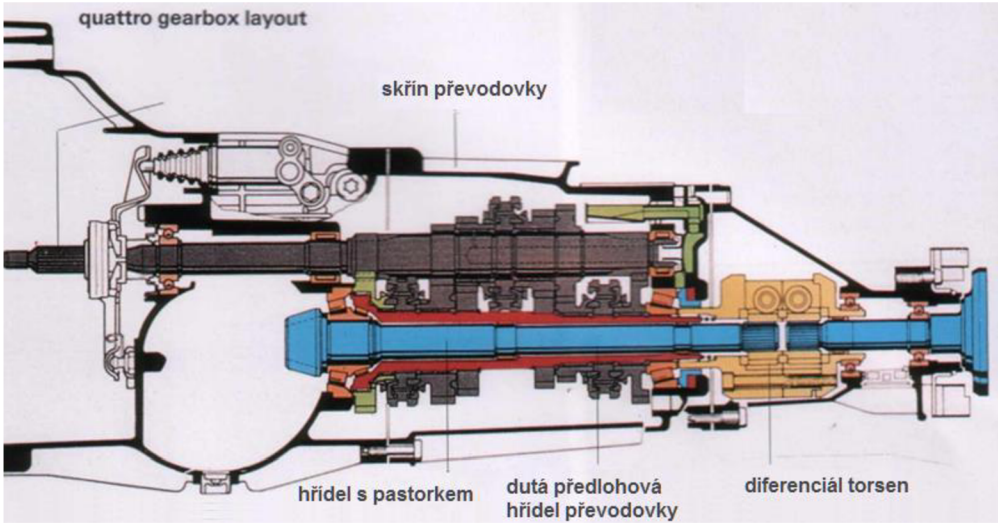


Obr. 17 Schéma nápravového diferenciálu Torsen typ A [14]

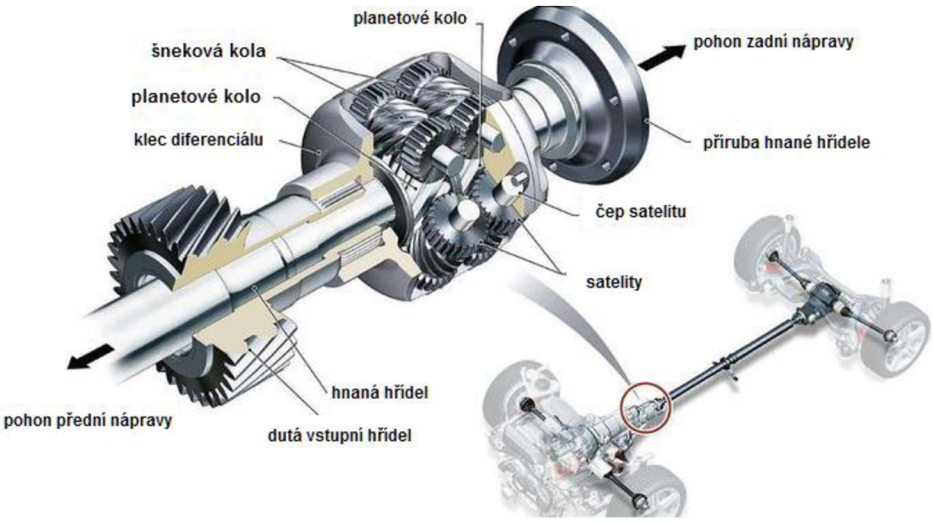
Při jízdě rovně, kdy obě kola jsou na stejném povrchu, se otáčí klec diferenciálu a unáší s sebou šneková kola a šneky. Kola uvnitř diferenciálu se tedy vůči sobě vzájemně nijak nepohybují a moment se mezi kola dělí rovnoměrně v poměru 1:1. [20]

Při situaci, kdy např. automobil zatáčí doleva, se pravé kolo začne otáčet rychleji. Tím pádem i pravý šnek se začne kolem své osy otáčet rychleji a roztočí pravé šnekové kolo. To posléze roztočí levé šnekové kolo. Jak je z principu šnekového soukolí známo, šnekové kolo nemůže roztočit šnek. (pozn.: to platí ovšem za předpokladu, že soukolí má tak nízkou účinnost, že dojde k samosvornosti, u Torsenu ale pouze dojde ke zvýšenému tření a celková samosvornost je vyvozena více mechanismy). Tím pádem levé šnekové kolo nemůže roztočit levý šnek. Levý šnek se ale točí a tím pádem roztáčí šnekové kolo.

Zajímavé bylo řešení v rámci pohonu všech kol Audi Quattro, kde byl mezi lety 1986–2007 Torsen typ A použit jako mezinápravový. [21] Toto řešení nahradilo otevřený diferenciál s uzávěrkou z předchozí generace. Točivý moment z převodovky byl pomocí duté předlohové hřídele přenášen rovnou na klec diferenciálu. Odtud už vedla hřídel s pastorkem do předního diferenciálu a na druhé straně hřídel s přírubou pro připojení kardanu zadní nápravy.



Obr. 18 Rozvodovka s mezinápravovým diferenciálem Audi Quattro (1986-2007) [22]



Obr. 19 Detail mezinápravového diferenciálu Audi Quattro [23]

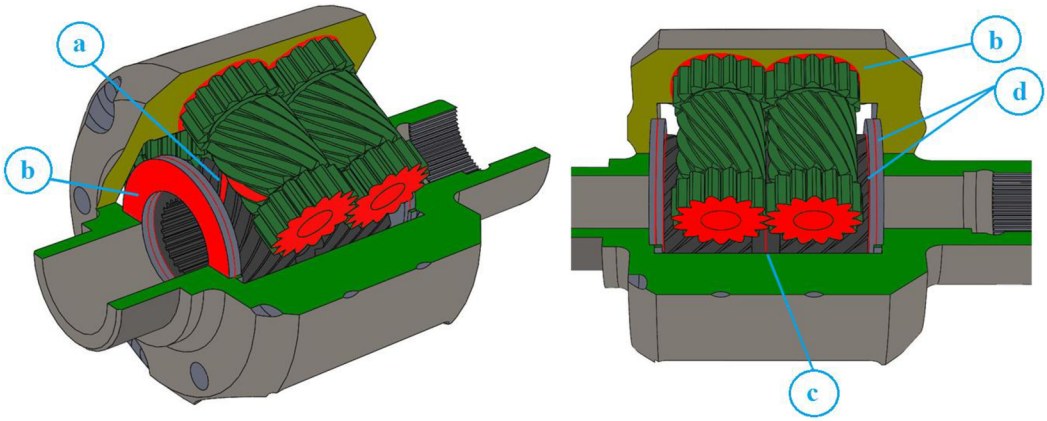
ZVÝŠENÉ TŘENÍ

Mechanismus je uspořádán jako šnekové soukolí, nicméně liší se tím, že je zde použito patentované šikmé ozubení Invex™.

Svornost je zde vyvozena tím, že při odvalování šikmého ozubení vzniká zvýšené tření a s tím spojené ztráty. V šikmém ozubení kromě radiálních sil působí i síly axiální. Šneky jsou na drážkovaných hřídelích uloženy posuvně a tím pádem se v důsledku těchto axiálních sil můžou pohybovat.

Tření potom vzniká [24]:

- v ozubení mezi šnekem a šnekovým kolem (a)
- mezi čely šnekových kol, třecími podložkami a klecí diferenciálu (b)
- mezi čely pravého a levého šneku (c)
- mezi čely šneků a klecí diferenciálu (d)



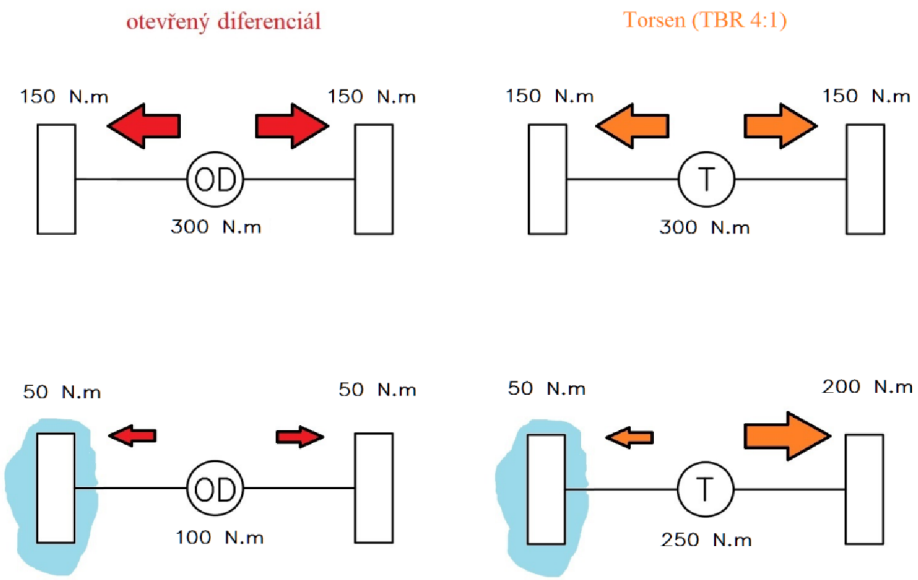
Obr. 20 Zóny zvýšeného tření u diferenciálu Torsen typ A [14]

DĚLENÍ MOMEMTŮ

V tom se diferenciály Torsen zásadně liší od ostatních. V případě, že auto jede rovně a oba kola jsou na stejném povrchu a mají stejný součinitel adheze, se rozděluje v poměru 50:50 (dále bude použito značení 1:1).

Hlavní přednost Torsenu spočívá v tom, že je schopný až x-krát více momentu přenést na kolo s lepší trakcí. Neznamená to ale, že můžeme využít 100 % výkonu. Pro názornost, motor dává na výstupu 300 Nm točivého momentu a protáčející kolo je schopno přenést pouze 50 Nm na povrch, po kterém jede. V případě klasického otevřeného diferenciálu by se na kolo s dobrou trakcí přeneslo pouze 50 Nm, díky poměru 1:1. Celkový točivý moment na kolech by byl tedy 100 Nm.

V případě Torsenu s poměrem 4:1, kolo s lepší trakcí přenese až 4x více momentu. Celkový točivý moment na kolech je tedy 250 Nm.



Obr. 21 Rozdělení točivého momentu [14]

Hodnota 4:1 znamená také to, že 80 % bude přeneseno na kolo s lepší trakcí a 20 % na kolo s horší trakcí. Svornost se dá vyjádřit rozdílem těchto procentuálních hodnot, tedy 60 %.

Poměr momentů může být tedy od 1:1 až do 4:1. Například, pokud by motor dával pouze 150 Nm točivého momentu na výstupu a prokluzující kolo je schopno přenést 50 Nm, tak na druhé kolo „zbude“ pouze 100 Nm, což je pouze 2x více než na prokluzujím kole. [20]

Poměr dělení momentů se v literatuře označuje také jako TBR (Torque Bias Ratio), je dán konstrukcí Torsenu a v průběhu životnosti se nemění. Hodnota TBR může být v rozmezí 2,5:1 až 5:1. [25]

Torsen má však jeden zásadní nedostatek. Pokud jedno kolo bude ve vzduchu (jinými slovy bude mít nulovou trakci), tak se neuzamkne a bude se chovat stejně jako otevřený diferenciál. Protože pokud se nulový moment znásobí TBR, moment na druhém kole bude stále nulový a veškerý točivý moment bude putovat do protáčejícího se kola. [20] I přesto je však Torsen díky poměrnému rozdělování momentu mnohem efektivnější než otevřený diferenciál.

Mezi jeho výhody patří:

- jednoduchost
- bezúdržbovost
- plynulý chod
- využití u různých druhů automobilů

Mezi jeho nevýhody patří:

- nefunkční při nulové trakci jednoho kola
- uživatelské nastavení – není možné měnit jeho vlastnosti

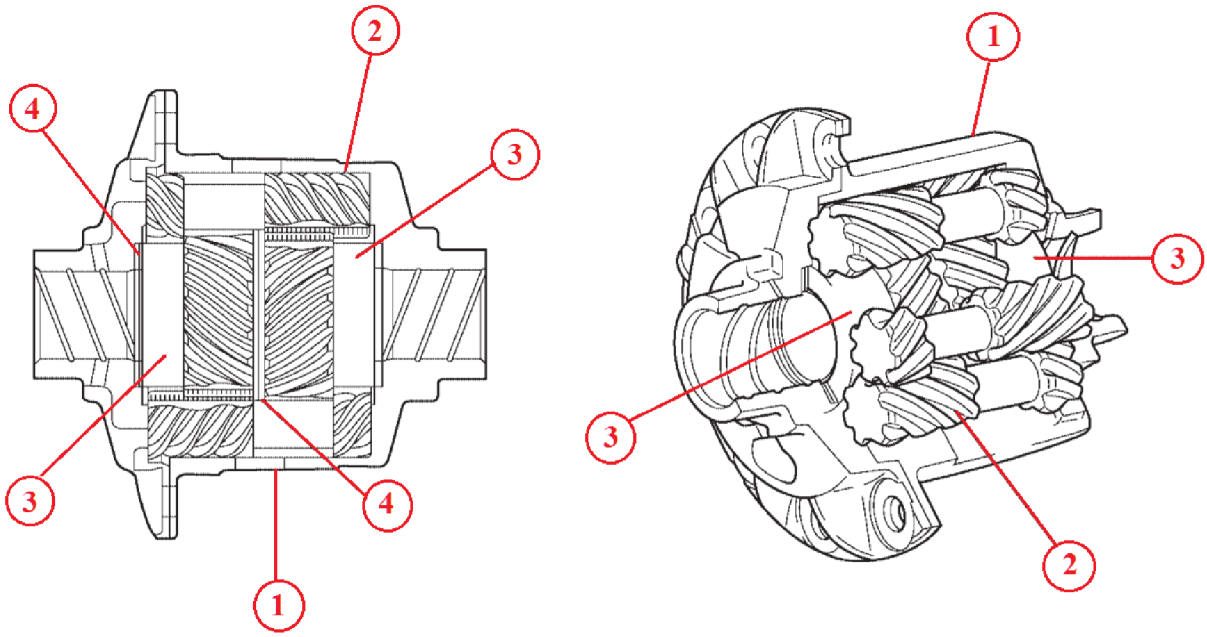
4.4.2 TORSEN TYP B

Torsen typu B není už tolik známý, ale je dnes mnohem používanější než typ A. Jde o diferenciál se symetrickým dělením momentu a používá se spíše jako nápravový. Narozdíl od typu A už zde nejsou šneky a šneková kola, ale satelity a centrální kola, které mají rovnoběžné osy. Umístěním ozubených kol tedy připomíná spíše čelní diferenciál. Výhodami i nevýhodami se od typu A však téměř neliší.

Používá se patentované šikmé ozubení Equvex™. Dalším patrným rozdílem oproti Torsenu A je absence čepů satelitů. Zde jsou umístěny volně ve výřezech klece.

Používal se jako diferenciál přední nápravy například u vozu Ford Focus RS, dodávala ho firma Quaife pod obchodním názvem *ATB*.

Skládá se z klece (1), která má v sobě kruhové výřezy a v těch jsou volně uloženy satelity (2). Každý satelit je spojen s jedním centrálním kolem (3) a pak ještě se sousedním satelitem. To vytváří pevnou vazbu mezi oběma centrálními koly, z kterých pak vystupují poloosy. Mezi dvěma centrálními koly pak ještě mezi každým centrálním kolem a klecí jsou ještě umístěny třecí podložky (4) pro zvýšení tření. Ty jsou stlačovány v důsledku vzniku axiálních sil a to způsobuje samosvornost.

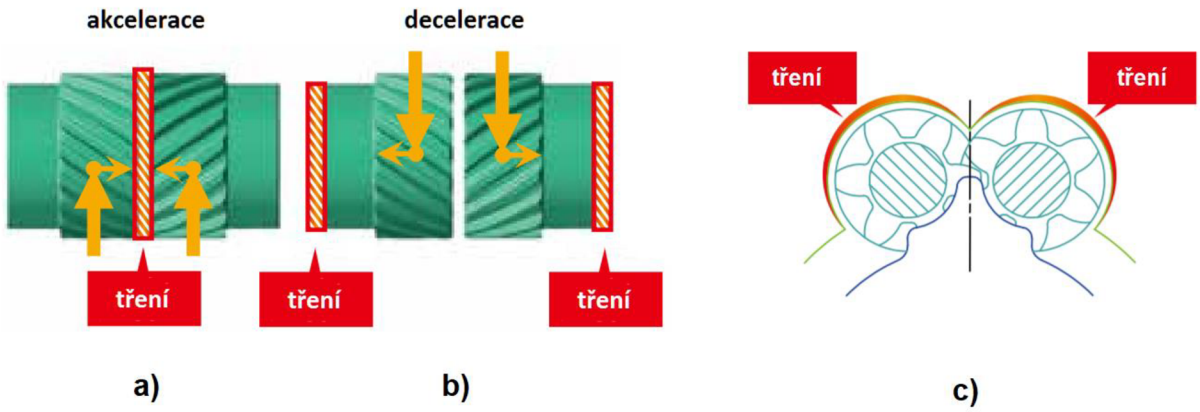


Obr. 22 Řez diferenciálem Torsen typ B [26]

Při jízdě rovně klec pouze unáší satelity, ty pak s sebou unáší centrální kola a kola uvnitř klece se tak vůči sobě neotáčí. Při průjezdu zatáčkou, kdy vnější kolo se otáčí rychleji, tak se i vnější centrální kolo bude otáčet rychleji, roztočí „svůj“ satelit, ten pak roztočí druhý satelit a ten roztočí vnitřní centrální kolo. To opět tedy v důsledku bude znamenat, že o co se vnější kolo bude zrychlovat, o to se vnitřní kolo bude zpomalovat. [3]

Ke zvýšenému tření dochází hlavně [27]:

- mezi centrálními koly (a)
- mezi centrálními koly a klecí (b)
- mezi satelity a výřezy klece (c)



Obr. 23 Zóny zvýšeného tření u diferenciálu Torsen typ B [27]

Jako jediný z Torsenů má typ B i ekvivalenty, které jsou konstrukčním řešením dost podobné. Patří mezi ně model „ATB“ od firmy *Quaife* nebo „Truetrac“ od firmy *Eaton*. Quaife byl například součástí výbavy sériově vyráběných vozů Ford Focus Mk3.

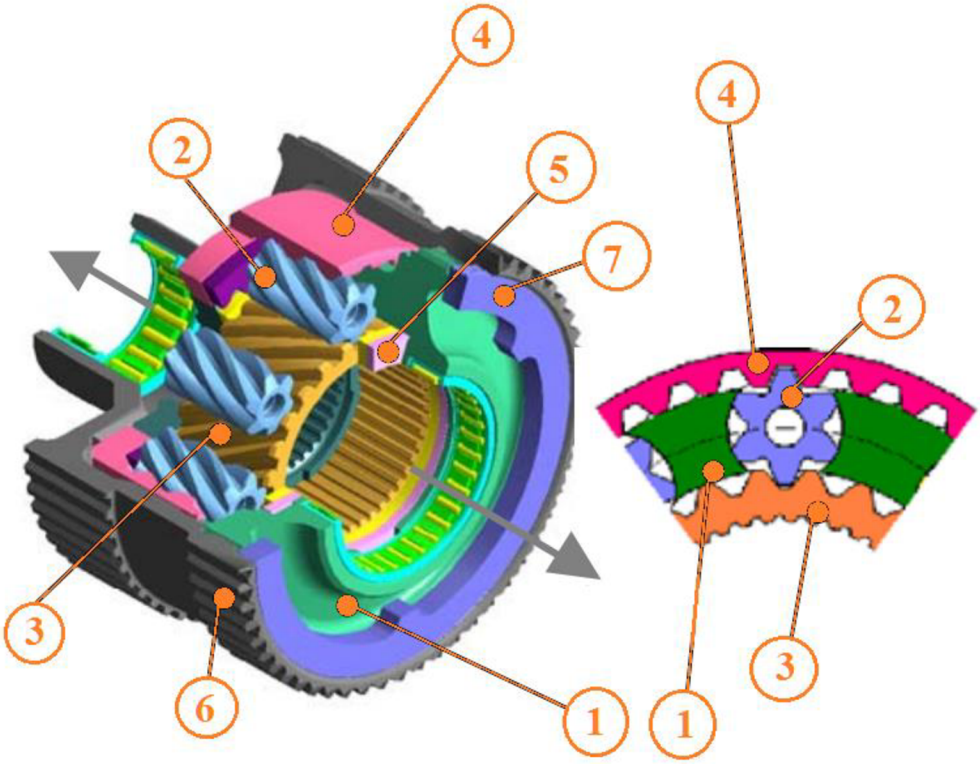
Obr. 24 Diferenciál Quaife ATB [28]

4.4.3 TORSEN TYP C

Torsen typ C je mezinápravový asymetrický diferenciál. Svou konstrukcí se jedná prakticky o planetové soukolí. Podobně jako u typu B je zde použito šikmé ozubení. Typ C za běžných podmínek dělí moment asymetricky na přední a zadní nápravu, tzn. v jiném poměru než 50:50.

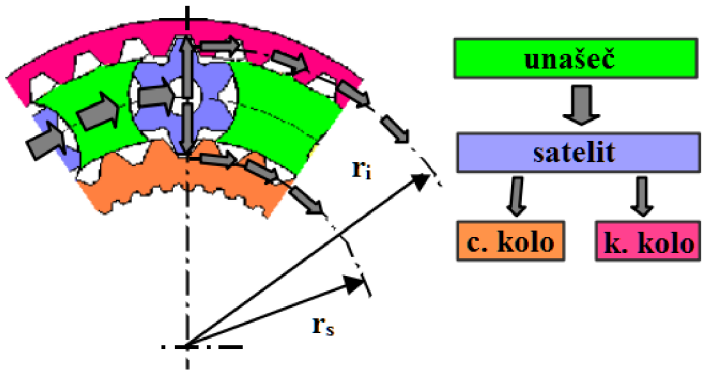
Poprvé se objevil v roce 2003 ve voze Toyota Land Cruiser, ale používal se třeba také u vozů Audi vybavené systémem Quattro od roku 2005. [3] [29]

Funguje obdobně jako planetové soukolí. Čepy satelitů však stejně, jako u typu B, odpadají. Točivý moment je přiváděn na unášeč (1), v němž jsou uloženy satelity (2). Počet satelitů se určuje podle toho, s jakým točivým momentem musí pracovat. Satelity z jedné strany ve styku s vnitřním centrálním kolem (3), z kterého moment putuje na jednu nápravu a z druhé strany s klecí (4) pomocí vnějšího ozubení a odtud moment putuje na druhou nápravu. Pokud na jdné nápravě poklesne trakce, tak díky šikmému ozubení vzniknou axiální síly. Tyto síly působením na třecí podložky (5) způsobí, že vznikne svornost a moment bude přesměrován na nápravu s lepší trakcí. Celé soukolí je ve skříni diferenciálu (6) a je pojištěno šroubovacím kroužkem (7). [3] [30]



Obr. 25 Řez diferenciálem Torsen typ C [30]

Asymetrické dělení momentu je způsobeno rozkladem síly na obvodu satelitu.



Obr. 26 Dělení momentu v diferenciálu Torsen typ C [30]

Dělení vychází z těchto vzorců [30]:

$$M_{pn} = \frac{r_s}{r_s + r_i} [\%] \tag{4.4.3.1}$$

$$M_{zn} = \frac{r_i}{r_s + r_i} [\%] \tag{4.4.3.2}$$

Kde:

M_{pn} ..... procentuální množství momentu na přední nápravě

M_{zn} ..... procentuální množství momentu na zadní nápravě

r_i ..... roztečná kružnice ozubení korunového kola

r_s ..... roztečná kružnice ozubení centrálního kola

Může se však měnit v závislosti na jízdních podmínkách. Například u Toyoty Land Cruiser mohl nabývat hodnot 28:72 až 58:42. [30]

Mezi jeho hlavní výhody patří [30]:

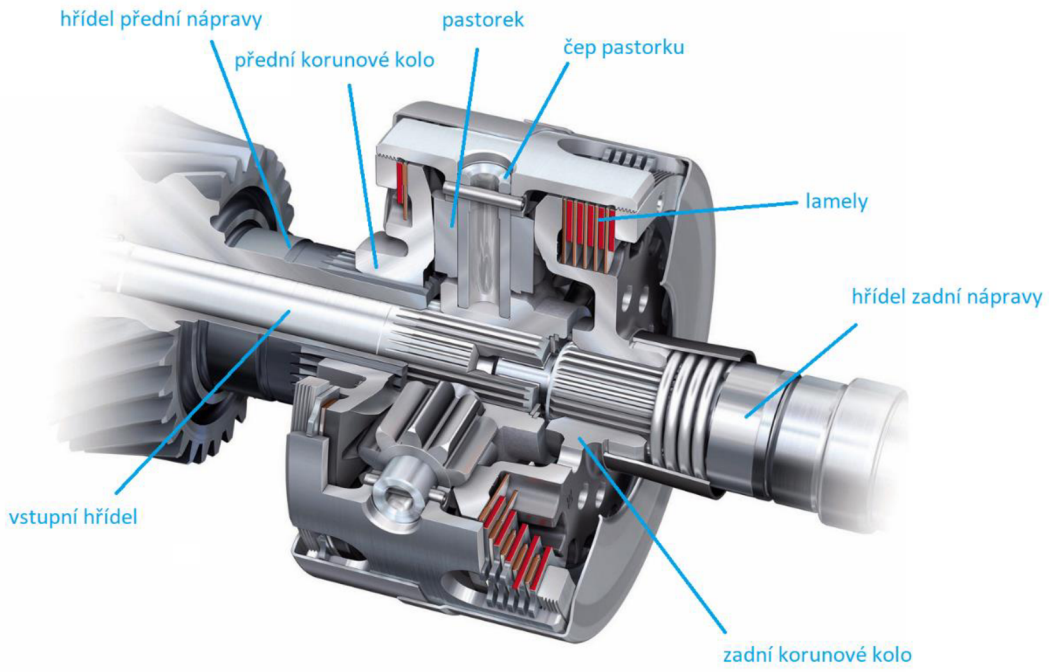
- nízká hmotnost
- kompaktnost
- vynikající životnost a pevnost, kterou lze zvýšit vyšším počtem satelitů
- nízká cena

4.5 KORUNOVÝ DIFERENCIÁL

Tento kousek vyvinulo Audi jako mezinápravový diferenciál systému Quattro, který se začal používat v roce 2010 a nahradil tak Torsen používaný v předchozích generacích. Na rozdíl od svého předchůdce není citlivý na rozdíl momentů, ale na rozdíl rychlostí. Mezi jeho největší přednosti patří kompaktnost a hmotnost – s 4,8 kg je téměř o 2 kg lehčí než Torsen. [31] Jedinou nevýhodou bude zřejmě jen to, že jsou zde lamely a ty budou určitě podléhat nějakému opotřebovávání.

Svou konstrukcí se naprosto odlišuje od ostatních diferenciálů. Skládá se ze dvou korunových kol, přičemž každé je spojeno s hřídelí jdoucí do diferenciálu přední nebo zadní nápravy. Vstupní hřídel je vedena dutinou hřídele přední nápravy a je spojena s klecí pomocí čepů, na kterých jsou otočně umístěny ozubené pastorky. Tyto pastorky zabírají na každé straně s jedním korunovým kolem. Mezí klecí a korunovými koly jsou pak ještě lamely, které jsou střídavě nasunuty na klec a náboj. Za daných situací se stlačují a klec s korunovým kolem se tak částečně spojí. Za normálních podmínek se však otáčí klec s pastorky a koly jako jeden celek. [31]

Zajímavou vlastností je, že pastorky zabírají s předním korunovým kolem na menším poloměru než se zadním korunovým kolem a tím je dán poměr rozdělení momentů na přední a zadní nápravu v poměru 40:60. Tento poměr se může pohybovat v rozmezí 15:85 až 70:30 v závislosti na tom, která náprava ztratí trakci. Poměr dělení momentů se mění díky vzniku axiálních sil, které vznikají při roztočení pastorků mezi koly. [31]

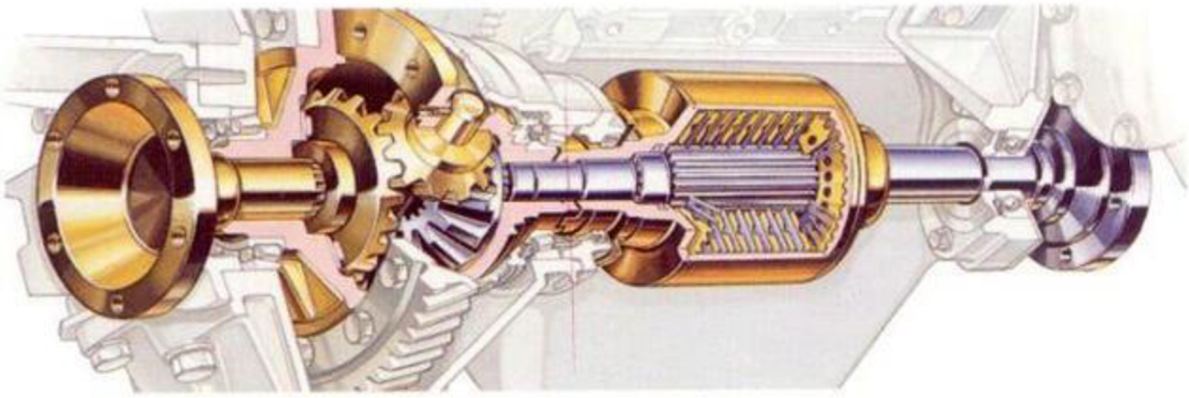


Obr. 27 Korunový diferenciál [32]

4.6 VISKÓZNÍ SPOJKA

U samosvorných diferenciálů stojí taky za zmínku diferenciál v kombinaci s viskózní spojkou. Je to další z diferenciálů, které jsou citlivé na rozdíl rychlostí, a to pomocí hydrodynamického odporu. V minulosti se používal pod názvem *Viscodrive* u vozů Lancia nebo ve Fiatu Coupé, který byl ve své době nejrychlejším vozem s pohonem předních kol na evropském trhu. Spojka se ale také umisťovala mezi nápravy vozů s pohonem všech kol. V dnešní době jej ale nahradily mnohem sofistikovanější systémy jako třeba Haldex.

Jak lze vidět na obrázku níže, jde vlastně o kombinaci otevřeného diferenciálu s viskózní spojkou. Zde se jedná o nápravový diferenciál. Spojku tvoří pouzdro s vnitřním drážkováním a hřídel s vnějším drážkováním. Lamely jsou axiálně nasunuty střídavě na pouzdro a hřídel. Navzájem se však nedotýkají, protože veškerý meziprostor je naplněn silikonovým olejem, který s rostoucí teplotou mění své vlastnosti a dochází ke zvýšenému vnitřnímu tření. Pro přenos větších točivých momentů mají na sobě vnitřní lamely radiální výřezy a vnější kruhové výřezy. Drážkovaný hřídel procházející spojkou pokračuje dál do planetového kola v diferenciálu. Pouzdro spojky je spojeno s klecí diferenciálu pomocí zubové spojky. [33]



Obr. 28 Diferenciál s viskózni spojkou Viscodrive [34]

Pokud automobil jede rovně a obě kola se točí stejně, lamely se vůči sobě netočí. Při průjezdu zatáčkou, kdy úhlové rychlosti nejsou tak rozdílné, spojka dovoluje malý prokluz a diferenciál se tedy nezamyká. V případě, že se jedno kolo protáčí mnohem rychleji, se pak buď vnitřní, nebo vnější lamely otáčí relativně rychleji, dochází ke zvýšení tření a díky tomu se pak sjednocují otáčky hřídele a spojky, přes kterou se moment přenáší na klec a následně na kolo s lepší trakcí. [33]

Je to tedy poměrně jednoduchý způsob, jak dosáhnout svornosti, ovšem nevýhodou je zpožděná reakce spojky a její nepředvídatelnost. [35]

5 AKTIVNÍ DIFERENCIÁLY A SYSTÉMY

Bohužel i samosvorné diferenciály mají své neduhy a bylo potřeba najít cestu, jak se těchto nedostatků zbavit a tím zlepšit jízdní vlastnosti automobilu, s tím související komfort a pocit řidiče z jízdy. Zároveň se díky lepší ovladatelnosti a předvídatelnosti zvyšuje bezpečnost jízdy. Tuto díru zaplnily různé aktivní diferenciály a systémy.

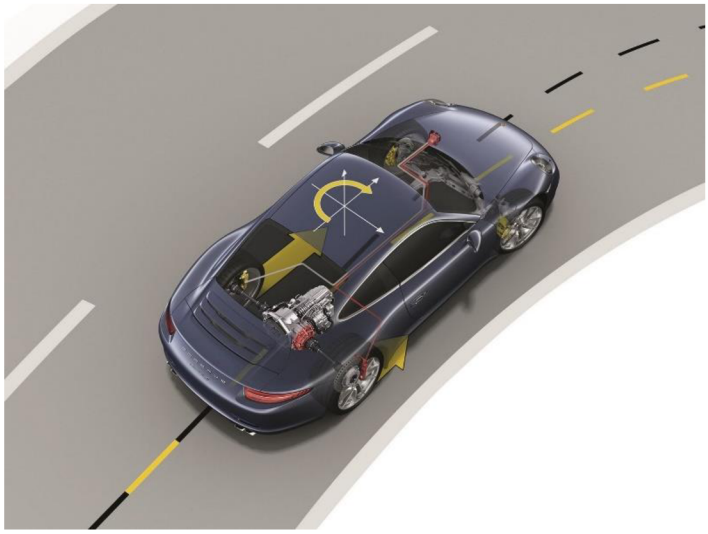
Aktivní elektronické systémy v automobilech jsou jedny z prvků aktivní bezpečnosti, ale kromě prevence proti nehodám je lze využít i pro zlepšení ovladatelnosti vozidla.

Protože jde často o pohon všech kol, kde jsou tyto aktivní vymoženosti s oblibou využívány, bude tato kapitola zaměřena nejen na fúzi diferenciálů a aktivních prvků, ale i na jiná řešení rozvodu momentu na nápravě nebo mezi nimi. v těch nejznámějších pohonech všech kol od různých výrobců.

Mnohdy je v nich diferenciál nahrazován různými systémy s lamelovou spojkou, které také slouží k vyrovnávání otáček a přenosu točivého momentu, proto je potřeba se zmínit i o nich.

5.1 TORQUE VECTORING

Prakticky všechny systémy fungují na principu Torque Vectoring Jeho princip spočívá v efektivním rozvodu točivého momentu na kola v závislosti na jízdních podmínkách, které vyhodnocuje elektronika. Pokud například chceme rychle projet zatáčkou, přivede se více točivého momentu na vnější kola a tím vznikne stáčivý moment, který napomáhá zatáčení vozidla. Lze jej ale samozřejmě použít, pokud některé z kol prokluzuje. [36]



Obr. 29 Vznik stáčivého momentu [37]

Toho se dá docílit v zásadě dvěma způsoby. Tím prvním je jednoduchý a nenákladný způsob, kdy úmyslně přibržďujeme protáčející kolo a který se používá v kombinaci s otevřeným diferenciálem. Tím druhým je použití aktivního diferenciálu, který je však nákladný, složitý a najdeme jej proto převážně v drahých sportovních vozech. [36]

Brzděním lze imitovat aktivní diferenciál tím, že se v zatáčce záměrně přibrzďuje vnitřní kolo. Tím se vytváří brzdící moment a díky tomu se pak více momentu převede na vnější kolo.

Výsledkem je požadovaná dotáčivost a stabilita v zatáčce, ovšem za cenu zpomalení vozidla. [36]

Elektronický systém pracující na tomto principu se nazývá EDS – Elektronische-Differenzial-Spere (nebo také EDL – Elektronic Differential Lock). Vychází především z dat ze snímačů ABS, které snímají otáčky kol. Jeho modifací je systém XDS, s kterým se setkáme u sportovnějších vozidel a funguje i za vyšších rychlostí. [38]

Obdobným systémem je také 4ETS, který se používá u pohonu všech kol 4Matic vozů Mercedes Benz. [39]

Všechny tyto systémy spadají pod pod *ESP* (Electronic Stability Program), jehož cílem je zvýšení kontroly nad vozidlem v krajních jízdních situacích. Snižuje tedy například riziko smyku a zvyšuje jízdní stabilitu. U BMW je systém založený na podobném principu pojmenován jako DSC (Dynamic Stability Control). [40]

Oproti tomu aktivní diferenciál tvoří otevřený kuželový diferenciál, který má zpravidla na každé poloose lamelovou spojku. Ta bývá ovládána buď hydraulicky nebo elektromechanicky. Pokud jede auto rovně, spojky sepnuté nejsou. Až v případě, kdy auto vjede do zatáčky, se sepne spojka na vnějším kole a tím se přenese větší množství momentu než na vnitřní kolo. [36]

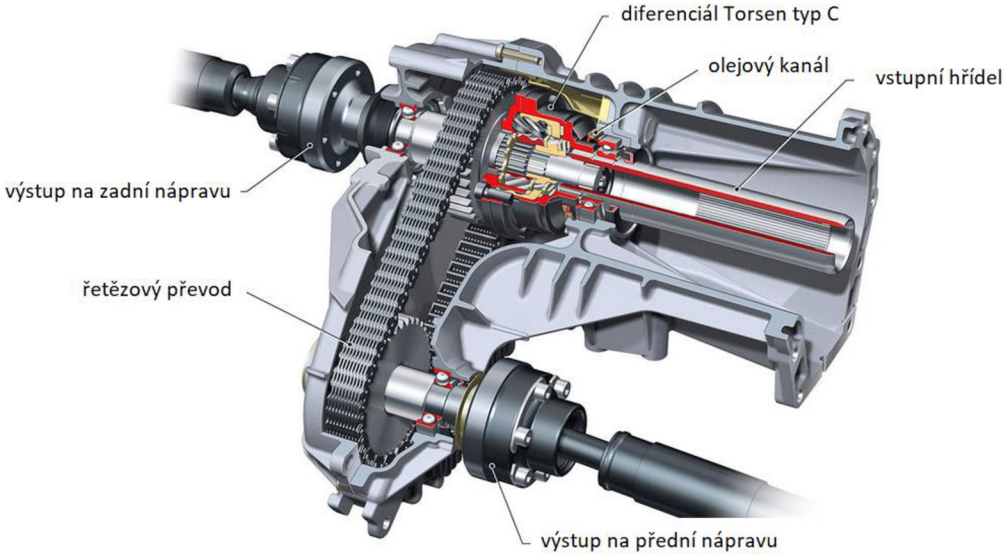
5.2 AUDI QUATTRO

Vývoj pohonu všech kol od Audi začal **v roce 1978** a impulsem k němu bylo testování vojenského automobilu Volkswagen Iltis. Poté, co vývoj prošel různými etapami a byl testován na modelu Audi 80, byl systém Quattro poprvé oficiálně představen na ženevském autosalonu v roce 1980 a to ve voze s příznačným názvem – Audi Quattro. Tak vznikl jeden z nejproslulejších pohonů všech kol, který proslavilo hned několik úspěchů v motosportu, mezi něž patří například mistrovské tituly v rallye z let 1983 a 1984. V této podkapitole ale bude věnována pozornost pouze evoluci v sériově vyráběných vozech. [41]

Zatímco v prvních generacích šlo o čistě mechanický systém, v roce už byla u verzí s automatickou převodovkou použita elektronika, a to v mezinápravovém lamelovém diferenciálu. Pokud přední kola ztratila trakci, řídicí systém diferenciál uzavřel a až 100 % točivého momentu mohlo proudit na zadní nápravu. Ve verzi s manuální převodovkou byl namísto lamelového diferenciálu použit Torsen typ 1. [21]

V roce 1996 se poprvé objevil elektronický systém **EDS – Elektronische Differenzialsperre** (označovaný také jako EDL – Electronic Differential Lock), o kterém byla řeč v kapitole 5.1. a **v roce 1998** byl dokonce poprvé použit **Haldex**, o kterém zas bude zmínka v kapitole 5.3.

V roce 2005 byl pak Torsen typ 1 (typ A) nahrazen typem 3 (typ C), který má výchozí dělení momentu na přední a zadní nápravu v poměru 40:60 (poměr se může měnit v závislosti na jízdních podmínkách v rozmezí 70:30 až 15:85). Do diferenciálu je hnací moment přiváděn na unašeč se satelity. Větší část momentu se dělí na vnější korunové kolo a z něj na hřídel vedoucí k zadní nápravě. Menší část momentu se dělí na vnitřní centrální kolo, které je spojeno s dutou hřídelí a s ní spojeným ozubeným kolem. Kolo je spojeno řetězovým převodem s dalším kolem, které už je připojeno k výstupní hřídeli přední nápravy. [21]



Obr.30 Rozdělovací převodovka s diferenciálem Torsen typ C (Audi Quattro) [42]

Další inovací byl v roce 2010 speciálním korunový diferenciál (viz. kapitola 4.5), který nahradil Torsen typ 3 (typ C), avšak dělení momentu zůstalo stejné. Elektronika je použita opět až na samotných nápravách ve formě EDS. [21]

V roce 2019 Audi představilo čistě elektrický pohon všech kol s názven e-tron quattro, kde už prakticky žádný diferenciál nenajdeme. Rozvod točivého momentu je řešen pomocí dvou elektromotorů s integrovanou převodovkou od firmy Schaeffler (jeden na přední a druhý na zadní nápravě). Podrobná tabulka, jak se vyvíjel systém Quattro, je níže. [21]

Tab. 1 Evoluce pohonu všech kol Audi quattro

počátek výroby	**diferenciál**			**poznámka**
	přední	**mezinápravový**	**zadní**	
1980	O	O+Z	O+Z	
1986	O	T1	O+Z	
1988	O	T1	T1	verze s man. převodovkou
	O	LD elektro.	T1	verze s auto. převodovkou
1996	O+EDS	T1	O+EDS	
1998	O+EDS	HALDEX	O+EDS	
2005	O+EDS	T3	O+EDS	
2007	O+EDS	VS	SS	pouze u modelu R8 42
2008			SD	Sport Differential
2010	O+EDS	KD	O+EDS	
2015	O+EDS	HALDEX	SS	pouze u modelu R8 4S
2016	O+EDS	LS (Flex4)	O+Z (Flex4)	quattro ultra
2019	-	-	-	e-tron

Kde:

O ..... otevřený diferenciál

Z..... uzávěrka diferenciálu

LD elektro..... elektricky ovládaný lamelový diferenciál

T1..... diferenciál Torsen typ 1 (typ A)

T3..... diferenciál Torsen typ 3 (typ C)

EDS..... elektronická uzávěrka diferenciálu

KD ..... korunový diferenciál

HALDEX ..... lamelová spojka Haldex

SS..... samosvorný diferenciál

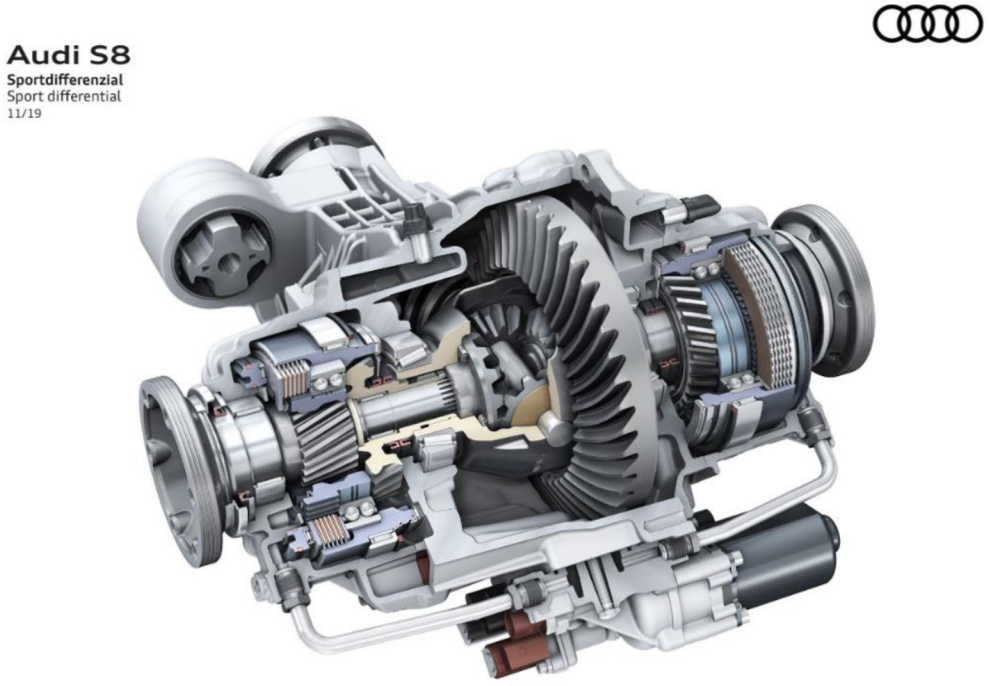
VS ..... viskózní spojka

SD ..... sportovní diferenciál

Z hlediska aktivních systémů je nutno se zmínit o těch novějších.

5.2.1 SPORT DIFFERENTIAL

Od roku 2008 byl k mání za příplatek aktivní sportovní diferenciál zadní nápravy (anglicky Sport Differential, německy Sportdifferenzial), který funguje bez zásahu EDS. [21]



Obr. 31 Audi Sport Differential [43]

Skládá se z otevřeného diferenciálu a lamelových spojek na každé poloose a elektrickým čerpadlem, které pomocí hydraulických pístů stlačuje lamely na jedné nebo druhé straně. Lamelová spojka zde nespojuje poloosu s klecí přímo, ale je zde ještě dvojitý převod s vnitřním ozubením. Patrně z důvodu zástavby diferenciálu, která takto umožní vhodné umístění hydraulického pístu stlačujícího lamely a tím kompaktnost celého zařízení. [44]

5.2.2 QUATTRO ULTRA

Později, **v roce 2016** přišlo Audi s pohonem Quattro ultra. Oproti přechozím generacím se pyšní snížením hmotnosti a take spotřeby paliva. Jde sice o pohon všech čtyř kol, ale s tím, že zadní náprava se připojuje jen v případě potřeby. Řídící jednotka neustále zpracovává data jako točivý moment motoru, úhel natočení volantu, příčné i podélné zrychlení a podle nich ovládá spínání systému. [45]

Připojení zadní nápravy funguje díky dvěma spojkám. Hned za převodovkou je umístěna elektromechanická lamelová spojka, která je ovládaná vřetenovou převodovkou. [45]

Z lamelové spojky pak vystupuje kardan, který je spojen se zadní nápravou. Na zadní nápravě je otevřený diferenciál vybavený zubovou spojkou, pomocí které lze rozpojit pravou poloosu od diferenciálu a umožnit tak nezávislé otáčení jednotlivých kol. I tato spojka je ovládaná elektromechanicky. [45]

Obr. 32 Audi quattro ultra [46]

Systém funguje následovně – pokud elektronika detekuje prokluz na přední nápravě, automaticky spíná lamelovou spojku, roztočí kardan na výstupu a ten roztočí zadní diferenciál. Teprve poté přijde na řadu sepnutí zadní zubové spojky. V případě odpojení se pak první odpojuje zubová spojka, až potom se rozepne spojka za převodovkou a dojde k zastavení kardanu. [45]

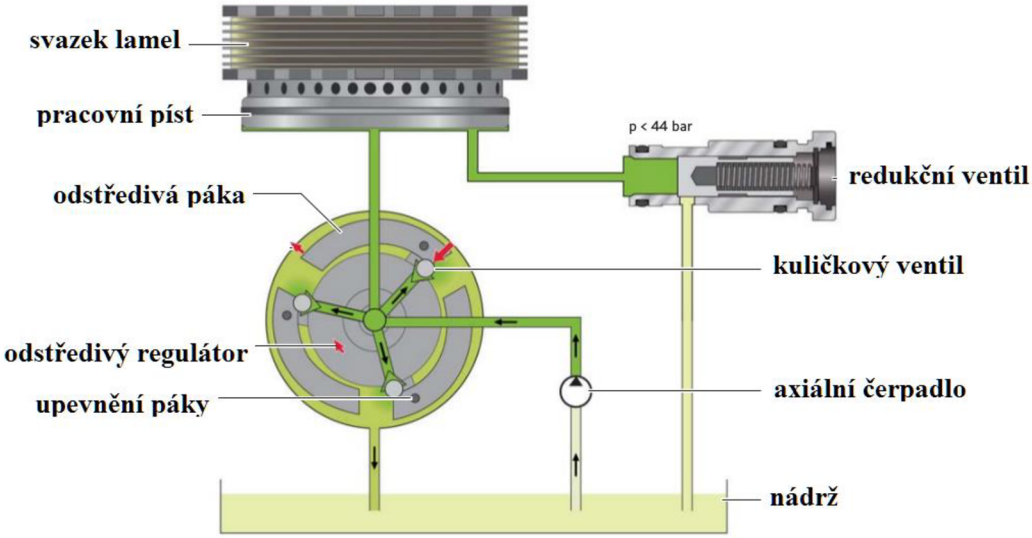
5.3 HALDEX

Haldex je obchodní značka švédské firmy Haldex AB (jejíž divize Traction Systems spadá od roku 2010 pod společnost Borg Warner), pod kterou se vyrábí systém používaný u pohonu všech kol. Jedná se o spojku umístěnou mezi nápravami, která je ovládaná elektrohydraulicky a díky spolupráci s elektronikou je schopna variabilně připojovat zadní nápravu. Primárně tedy auto funguje jako pohon předních kol s tím, že pokud poklesne trakce na přední nápravě, připojí se zadní náprava. Haldex bývá umístěn zpravidla před zadním diferenciálem. Je plně kompatibilní s elektronickými systémy a z činnosti je vyřazen například, když je zatáhnutá ruční brzda nebo při obyčejném brzdění, aby nezasahoval do funkce ABS.

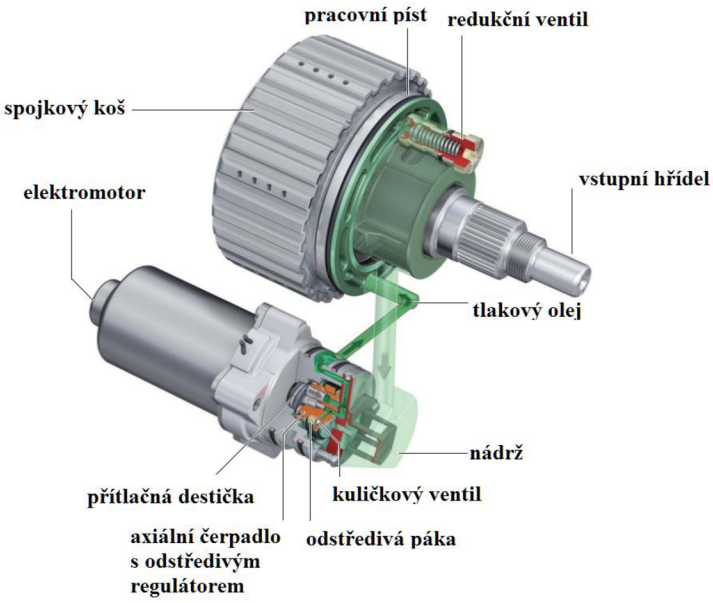
Jak Haldex procházel vývojem, tak existovalo několik generací. Ta první se objevila na trhu v roce 1998 a stejně jako následující druhá generace, pracuje jako reaktivní. To znamená, že spojka reaguje, až když nastane prokluz. V momentě, kdy byly na nápravách rozdílné otáčky, zafungoval Haldex jako hydraulické čerpadlo a pomocí vytvořeného tlaku se pak stlačily lamely k sobě. [47]

Oproti tomu další generace pracují už jako proaktivní, což znamená, že prokluzu předchází, a to vyhodnocováním různých jízdních dat a následným spínáním spojky. Dnes jej v nalezneme v řadě různých značek jako jsou Audi, Volkswagen, Škoda nebo Volvo. Mnohdy se skrývá pod názvy, jako jsou Quattro (Audi) nebo 4Motion (Volkswagen), kterých může (ale nemusí) být součástí. [45]

Funkce Haldexu bude popsána na poslední 5. generaci. Lamelová spojka sestává z vstupní hřídele a spojkového koše, na něž jsou střídavě nasunuty lamely. Ze strany vstupní hřídele na lamely tlačí hydraulický píst, který je spojen s hydraulickým čerpadlem. Mezi elektricky poháněné čerpadlo a píst je ale navíc vložen ještě odstředivý regulátor. Pokud vzrostou otáčky čerpadla, odstředivé páky na regulátoru se roztáhnou a tím uzavřou ventily, kterými jinak teče olej zpět do nádrže. Olej je tlačen na píst a přebytečný tlak je odváděn redukčním ventilem zpět do nádrže. [48]



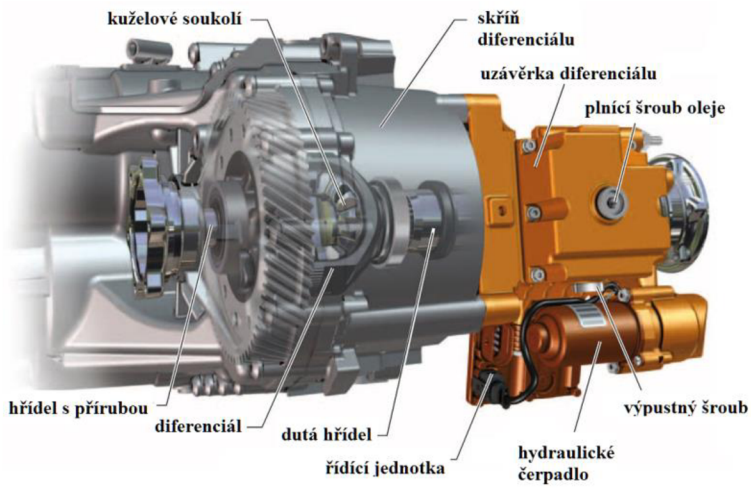
Obr. 33 Hydraulické schéma systému Haldex 5. generace [49]



Obr.34 Haldex 5. generace [49]

5. generace předčí generace předchozí tím, že je mnohem lehčí a méně komplikovanější.

Na většině vozů Haldex najdeme mezi nápravami. Například u systému Volkswagen VAQ je ale umístěn mezi koly přední nápravy a funguje tedy jako elektronická uzávěrka diferenciálu. [50]



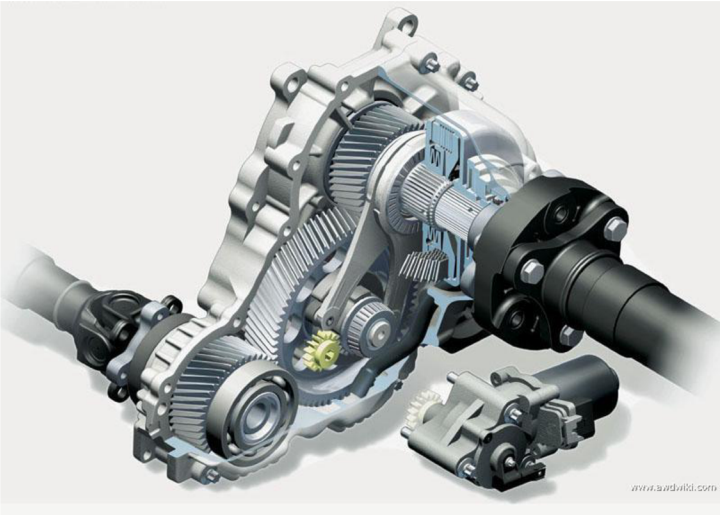
Obr.35 Elektronická uzávěrka diferenciálu (Volkswagen VAQ) [50]

5.4 BMW xDRIVE

S pohonem všech kol xDrive přišlo BMW v roce 1985. Tehdy byl pohon všech kol permanentní s upřednostněním zadní nápravy, a to v poměru 37:63 díky planetárnímu převodu. Pokud došlo k prokluzu na jedné z náprav, došlo k reakci viskózní spojky a tím až 80 % točivého momentu mohlo proudit na nápravu s lepší trakcí. [51]

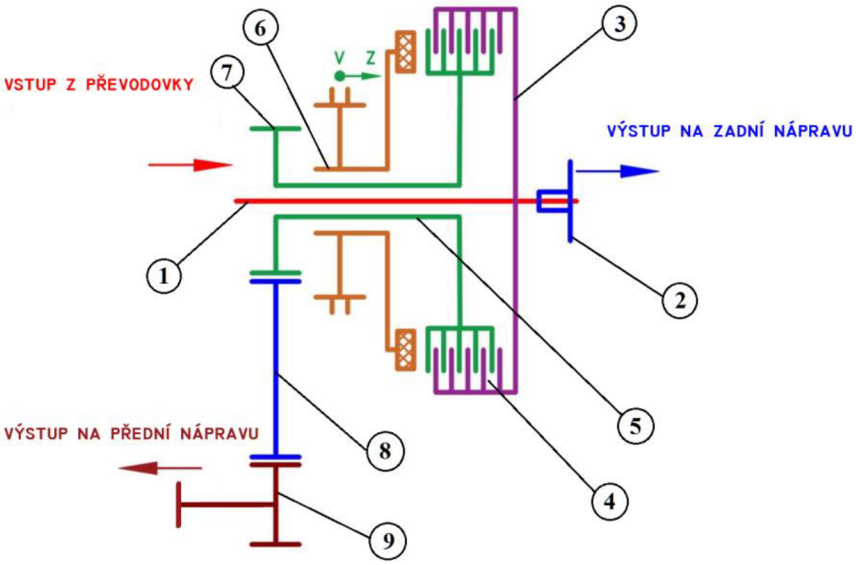
V dnešní době už je tento princip nahrazen mokrou lamelovou spojkou, která je součástí rozdělovací převodovky. V normálním režimu je točivý moment dělen v poměru 40:60 na

přední a zadní nápravu a je možné na jednu nápravu přenést až 100 %. Kromě takto řešené verze xDrive se objevuje u BMW ještě verze s Haldexem 5. generace. Dělení momentu je zde normálně 100:0 ve prospěch přední nápravy a v případě prokluzu až 50:50. Používá se ale jen v modelech s příčně uloženým motorem (BMW X1 a 2 Active Tourer), což je u BMW rarita. Všechny ostatní modely jsou totiž vyráběné s podélně uloženým motorem. [52]



Obr.36 Rozdělovací převodovka systému xDrive [53]

Princip bude vysvětlen na verzi s lamelovou spojkou.



Obr.37 Schéma rozdělovací převodovky systému xDrive [14]

Točivý moment je z převodovky přiváděn na hřídel, která prochází spojkou. Na jejím konci je pomocí příruby (2) připevněn kardan pro pohon zadní nápravy. Na hnací hřídel je nasunut dutý hřídel (5), který se dá pomocí lamel spojit se spojkovým košem. Lamely stlačuje přítlačný kotouč (6), jehož poloha se ovládá mechanismem, který je připojen k servomotoru. Tento mechanismus je otočně umístěn na ose vloženého ozubeného kola (8). Po spojení lamel dojde ke spojení spojkového koše a dutého hřídele, na jehož druhém konci je vstupní ozubené kolo (7) spojené s vloženým kolem (8). Na druhé straně je vložené kolo spojeno s výstupním kolem,

které už je pak spojeno pomocí příruby přímo s kardanem pro pohon přední nápravy. Schéma a technický popis vychází z konstrukčních obrázků. [54] [55]

Vložené ozubené kolo, které je součásti rozvodovky, se používá u modelů E60, E61, E90 nebo E92. Existuje ale také varianta, kdy je ozubené kolo nahrazeno ozubeným řemenem a používá se většinou u SUV modelů. [54]

Systém xDrive má vlastní řídící jednotku, která komunikuje se systémem *DSC* (z anglického Dynamic Stability Control), což je obdoba *ESP* používaná u BMW. Tento systém sleduje otáčky kol, úhel natočení volantu, rychlost stáčení vozidla a hodnoty příčného zrychlení. [56] Tato data jsou neustále vyhodnocována a xDrive podle toho rozvádí točivý moment tam, kde je potřeba. [54]

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo provést rešerši týkající se problematiky diferenciálů používaných ve stavbě automobilů, a to především těch samosvorných a provést detailní analýzu vybraného typu.

Na začátku je uvedení do problematiky a jde se postupně do hloubky. Naprostým základem je pochopení principu, jakým pracuje otevřený diferenciál. Jeho vlastnost, kdy za každých podmínek rozděluje moment v poměru 50:50, je oprávněným důvodem ke vzniku samosvorných diferenciálů. Ovšem i ty většinou vychází ze základní konstrukce otevřeného diferenciálu.

Samosvorným diferenciálům byla tedy, v 4. kapitole, věnována největší pozornost a snahou bylo vysvětlit, jak který typ funguje. Zajímavým řešením je bezpochyby Eaton MLocker G80, který je známější především v Americe.

Jedněmi z diferenciálů, které však z otevřených diferenciálů konstrukčně nevychází, jsou diferenciály Torsen. Tento typ byl podroben detailní analýze.

Torsen je velmi dobře známý pojem v tématice diferenciálů. Není však Torsen jako Torsen – člověk se s ním může setkat hned ve třech podobách – typy A, B a C. Typ A vychází ze šnekového soukolí, typ B je podobný čelnímu diferenciálu a typ C má zase nejblíže k planetovému soukolí. Jejich obrovskou předností je schopnost přenést v případě prokluzu jednoho kola či nápravy v extrémním případě až 5x více momentu na kolo, resp. nápravu s lepší trakcí. Kolikrát více to bude, je dáno specifickou konstrukcí a tato hodnota už nejde měnit.

Čtenáře však možná překvapí fakt, že tyto diferenciály nefungují, pokud jedno kolo zcela ztratí trakci. To je dáno tím, že mechanismus musí být v případě všech třech typů alespoň pod minimálním zatížením z obou stran. Pokud tomu tak není, mechanismus se „odlehčí“ a k žádnému zvýšenému tření nedochází. Toto zvýšené tření zde vzniká nejen ve šnekovém soukolí, ale také mezi koly a klecí navzájem.

I tak je to ale jeden z nejpoužívanějších samosvorných diferenciálů, který se proslavil zejména díky použití v pohonu všech kol Audi quattro.

Obecně samosvorné diferenciály ale fungují na mechanickém principu a nedokážou tak předcházet různým jízdním situacím.

Proto jsou v následující kapitole rozebrány ještě aktivní diferenciály a systémy, které jsou dnes s oblibou aplikovány v novějších vozidlech a podle mě bude tento trend pokračovat. Zlepšují totiž jízdní vlastnosti a také zvyšují bezpečnost. Ovšem za té podmínky, že elektronika je spolehlivá.

Samosvorné diferenciály podle mě ale i bez zásahu elektroniky mají dostatečně dobré jízdní vlastnosti, a to, aniž by se jednalo o složitou konstrukci.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

[1] JAN, Zdeněk, Bronislav ŽDÁNSKÝ, Jiří ČUPERA, Pavel SEDLÁK, Jan JETMAR a Adam POLCAR. *Automobily: Převody*. 5. vydání. Brno: Avid, spol. s r.o., 2018. ISBN 978-80-87143-32-2.

[2] VLK, František. *Převody motorových vozidel*. Brno: František Vlk, 2006. ISBN 8023964631.

[3] ACHTENOVÁ, Gabriela. *Převodná ústrojí motorových vozidel. Diferenciály a děliče momentu*. Praha: ČVUT, 2011. ISBN 978-80-01-04855-9.

[4] KAPLAN, Zdeněk. *Stálý převod* [online]. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha_fs.php?dpid=176367&skupina=dokument_priloha

[5] KAPLAN, Zdeněk. *Diferenciály* [online]. [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha_fs.php?dpid=176368&skupina=dokument_priloha

[6] Tatrovácká koncepce. In: *Tatra* [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.tatra.cz/proc-tatru/technicka-koncepce-tatra/tatrovacka-koncepce/

[7] Differential (mechanical device). In: *Wikiwand* [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.wikiwand.com/en/Differential_(mechanical_device)

[8] Ausgleichsgetriebe Differential. In: *Kfztech.de* [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.kfztech.de/kfztechnik/triebwerk/getriebe/ausgleichsgetriebe.htm

[9] Phantom Grip. *Phantom Grip* [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://phantomgrip.com/

[10] ALFERINK, Timon. Plated limited slip differential explained. In: *KMP Drivetrain Solutions* [online].ch 28.5.2019 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://www.kmpdrivetrain.com/differentials/plated-limited-slip-differential-explained/

[11] Cusco LSD Guide. *Cusco* [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: http://www.cuscousainc.com/downloads/dl/file/id/190/cusco_lsd_guide.pdf . Katalog firmy CUSCO.

[12] BMW Limited Slip Differential Upgrades. In: *Turner Motorsport* [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.turnermotorsport.com/t-Differential_Upgrade_Guide

[13] Eaton Mechanical Locking Differential. In: *Youtube* [online]. 8.9.2010 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=ftyJvIO0DZ8 . Kanál uživatele KUNZMANandASSOC.

[14] HOLEŇA, Vít. Archiv autora.

[15] MLocker (G80). In: *Eaton* [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.eaton.com/Eaton/ProductsServices/Vehicle/Differentials/mlocker/PCT_2196713

[16] MLocker (G80) locking differential. In: *Eaton* [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.eaton.com/us/en-us/catalog/differentials/mlocker.html

[17] CAPPA, John. Pros & Cons of Different Differentials - Making Traction. In: *FourWheeler* [online]. 23.4.2015 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://www.fourwheeler.com/product-reviews/1506-pros-and-cons-of-different-differentials-making-traction

[18] About Torsen. In: *Torsen Traction* [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://torsen.com/about-us/

[19] How it works. In: *Torsen Traction* [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://torsen.com/how-it-works/

[20] TIMMER, Gerben. Torsen vs. plated limited slip differential. In: *KMP Drivetrain Solutions* [online]. 21.4.2020 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.kmpdrivetrain.com/differentials/torsen-vs-plated-limited-slip-differential/

[21] Quattro Evolutions. *All Wheel Driven* [online]. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://www.awdwiki.com/en/quattro+evolutions/#quattro__I

[22] The quattro principle. In: *KVquattro.com* [online]. 1990 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: http://kvquattro.com/QuattroPrincipleFeb1990/QuattroPrincipleFeb1990005.jpg

[23] DUSIL, Tomáš. Velké srovnání systémů pohonu všech kol: V čem se liší? In: *Auto.cz* [online]. 6.12.2016 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://www.auto.cz/velke-srovnani-systemu-pohonu-vsech-kol-v-cem-se-lisi-101082

[24] CHOCHOLEK, S E. *The development of a differential for the improvement of traction control* [online]. Rochester, New York, USA: Gleason Corporation, 1988 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: http://www.zhome.com/ZCMnL/tech/Torsen/Torsen.htm

[25] *T-1 Torque Sensing Differential* [online]. 1999 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.hfintegrale.gr/cms/system/files/Torsen+T-1+Technical+Sheet.pdf . Katalog firmy ZEXEL TORSEN.

[26] *Helical gear type Torsen LSD* [online]. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: http://www.brokendragon.org/lexus/ncf/ncf163e/m_ch_0098.pdf

[27] *Torque sensing LSD* [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: http://eb-cat.ds-navi.co.jp/enu/jtekt/tech/eb/catalog/img/pdf/catd1001je.pdf. Katalog firmy JTEKT.

[28] ROSWELL, Glenn. FAST CAR LIMITED SLIP DIFFERENTIAL GUIDE. In: *FAST car* [online]. 10.4.2018 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.fastcar.co.uk/tuning/fast-car-limited-slip-differential-guide-lsd/

[29] 2005: The self-locking center differential in the Audi RS4. In: *Quattro Highlights* [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: http://m.audi-quattro-highlights.de/en/aqh/Technologies/Self-locking-center-differential/2005-The-self-locking-center-differential-in-the-Audi-RS-42

[30] YOSHIMURA, Takahiro, Hiroyuki SHIMOKASA a Raf SCHUERMANS. *Development of the Transfer Unit for the Toyota Land Cruiser* [online]. 2003 [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: https://pdfs.semanticscholar.org/1e59/16df64c80cd903bdaf6f68d8b1bf93e8b033.pdf

[31] Crown gear differential. In: *Audi Technology Portal* [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.audi-technology-portal.de/en/drivetrain/quattro_en/crown-gear-differential

[32] 2013 Audi RS4 Avant. In: *CARICOS* [online]. 13.4.2012 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.caricos.com/cars/a/audi/2013_audi_rs4_avant/images/90.html

[33] DUSIL, Tomáš. Technika: Samosvorné diferenciály – Stejný účel, různý princip. In: *Auto.cz* [online]. 9.2.2016 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.auto.cz/technika-samosvorne-diferencialy-stejny-ucel-ruzny-princip-92755

[34] Lancia Kappa. In: *Index Fórumok* [online]. 2007 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: http://imgfrm.index.hu/imgfrm/2/2/2/6/BIG_0003712226.jpg

[35] How Does Viscous Coupling Work? In: *All Wheel Driven: The all wheel drive encyclopedia* [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.awdwiki.com/en/viscous+coupling/

[36] KINGSTON, Lewis. What is torque vectoring? PH Explains. In: *PistonHeads* [online]. 17.7.2018 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.pistonheads.com/news/features/what-is-torque-vectoring-ph-explains/38379

[37] BIERMANN, Roger. Why Torque Vectoring Makes Driving So Much Fun. In: *CARBUZZ* [online]. 22.4.2018 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: https://carbuzz.com/features/why-torque-vectoring-makes-driving-so-much-fun

[38] EDS – Elektronicky řízený diferenciál. In: *Šmucler magazín* [online]. 14.10.2016 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.smucler.cz/blog/eds-elektronicky-rizeny-diferencial/

[39] SAJDL, Jan. 4ETS. In: *Autolexicon.net* [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.autolexicon.net/cs/articles/4ets/

[40] SAJDL, Jan. DTC (Dynamic Traction Control). In: *Autolexicon.net* [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.autolexicon.net/cs/articles/dtc-dynamic-traction-control/

[41] Retro: Audi Quattro je legenda, která v rallye zesměšnila konkurenci. In: *Autobible.cz* [online]. 14.4.2019 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://autobible.euro.cz/legenda-audi-quattro-auto-ktere-v-rallye-zesmesnilo-konkurenci/

[42] DUSIL, Tomáš. Pohony všech kol u ojetin: Ne všechny jsou bezúdržbové. Které vyžadují pozornost? In: *Auto.cz* [online]. 28.12.2017 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.auto.cz/pohony-vsech-kol-u-ojetin-ne-vsechny-jsou-bezudrzbove-ktere-vyzaduji-pozornost-112098

[43] The mechanical quattro systems. In: *Audi Media Center* [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.audi-mediacenter.com/en/40-years-of-quattro-the-all-conquering-technology-from-audi-12598/the-mechanical-quattro-systems-12602

[44] Audi – Sports Differential Working. In: *Youtube* [online]. 13.8.2017 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=8jJkDAdBcF4. Kanál uživatele Auto Magz.

[45] Audi quattro with ultra-technology. In: *Audi Technology Portal* [online]. 2016 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.audi-technology-portal.de/en/drivetrain/quattro_en/audi-quattro-with-ultra-technology-en

[46] GOMOLL, Wolfgang. Audi Quattro mit Ultra Technologie: Verbrauchs-Minimalismus. In: *AUTOMOBIL PRODUKTION* [online]. 15.2.2016 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: https://www.automobil-produktion.de/hersteller/neue-modelle/audi-quattro-mit-ultra-technologie-neues-pferd-380.html

[47] VOKÁČ, Luděk. Haldex je hodně chytrý pohon všech kol. Má ho octavia i Bugatti Veyron. In: *IDNES.cz* [online]. 10.5.2012 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/auto/zpravodajstvi/jak-funguje-haldex-pohon-vsech-kol.A120510_012556_automoto_vok

[48] DITTRICH, Lukáš. Haldex V: co je nového? In: *Autorevue.cz* [online]. 23.3.2013 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://www.autorevue.cz/haldex-v-co-je-noveho-doplneno/ch-47571#articleStart

[49] GENERATION 5 HALDEX FAULT FINDING REPAIR GUIDE. In: *Haldex Repairs: By Auto Fault Finder* [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.haldexrepairs.co.uk/generation-5-haldex-fault-finding-repair-guide/

[50] DUSIL, Tomáš. Technika: VAQ – Haldex mezi předními koly. In: *Auto.cz* [online]. 10.11.2014 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://www.auto.cz/technika-vaq-haldex-mezi-prednimi-koly-83999

[51] WAGENKNECHT, Martin. Technologie v autech: pohon všech kol xDrive. In: *FDrive.cz* [online]. 15.4.2014 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://fdrive.cz/clanky/technologie-v-autech-pohon-vsech-kol-xdrive-866

[52] JÁNSKÝ, Martin. Pohon všech kol přináší jistotu, ale neobírá ani o zábavu. In: *Garáž.cz* [online]. 17.1.2020 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.garaz.cz/clanek/bmw-xdrive-tour-4x4-21003288

[53] Systémy pohonu xDrive. *Subarufanclub.cz* [online]. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://subarufanclub.cz/wiki/technika/konkurence/systemy_pohonu_xdrive

[54] XDrive. In: *NewTIS.info* [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.newtis.info/tisv2/a/en/e90-320d-lim/repair-manuals/27-transfer-box/1xRwUzH

[55] System overview of xDrive: E60, E61, E90, E91, E92. *NewTIS.info* [online]. [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://www.newtis.info/tisv2/a/en/e91-316d-tou/repair-manuals/27-transfer-box/1s2D4pu

[56] XDrive. In: *NewTIS.info* [online]. [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: https://www.newtis.info/tisv2/a/en/e90-320d-lim/repair-manuals/27-transfer-box/21okW1c

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

4ETS	4-wheel Electronic Traction Systém
ABS	Anti Blocking System
ASR	Anti-Slip Regulation
DSC	Dynamic Stability Control
EDL	Electronic Differential Lock
EDS	Elektronische Differenzialsperre
ESP	Electronic Stability Program
HALDEX	lamelová spojka Haldex
KD	korunový diferenciál
LD elektro.	elektricky ovládaný lamelový diferenciál
O	otevřený diferenciál
SD	sportovní diferenciál
SS	samosvorný diferenciál
T1	diferenciál Torsen typ 1 (typ A)
T3	diferenciál Torsen typ 3 (typ C)
TBR	Torque Bias Ratio
VAQ	Vorder Achs Quersperre
VS	viskózní spojka
XDS	Electronic Differential Lock
Z	uzávěrka diferenciálu

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

i	[-]	převodový poměr
n	[s^{-1}]	otáčky
M_k	[N.m]	točivý moment
z	[-]	počet zubů
v_l	[$m.s^{-1}$]	rychlost levého kola
v_p	[$m.s^{-1}$]	rychlost pravého kola
R	[m]	poloměr zatáčky
a	[m]	rozchod kol
ω_l	[$rad.s^{-1}$]	úhlová rychlost levého kola
ω_p	[$rad.s^{-1}$]	úhlová rychlost pravého kola
M_{tmax}	[N.m]	maximální přivedený točivý moment
M_{pmax}	[N.m]	maximální točivý moment na pravém kole
M_{lmax}	[N.m]	maximální točivý moment na levém kole
μ_l	[-]	součinitel adheze levého kola
μ_p	[-]	součinitel adheze pravého kola
F_p	[N]	hnací síla na pravém kole
F_l	[N]	hnací síla na levém kole
r_d	[m]	poloměr kola
M_{pn}	[%]	procentuální množství momentu na přední nápravě
M_{zn}	[%]	procentuální množství momentu na zadní nápravě
r_e	[m]	roztečná kružnice ozubení korunového kola
r_i	[m]	roztečná kružnice ozubení centrálního kola
M_p	[N.m]	moment na pravém kole
M_l	[N.m]	moment na levém kole
M_{Tp}	[N.m]	třecí moment na pravém planetovém kole
M_{Tl}	[N.m]	třecí moment na levém planetovém kole

M_{Ts}	[N.m]	třecí moment na satelitu
r_{pl}	[m]	poloměr planetového kola
r_s	[m]	poloměr satelitu