



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrických pohonů a trakce**

Model protiskluzové ochrany železničních hnacích vozidel

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Studijní obor: Elektroenergetika

Vedoucí práce: Ing. Jan Bauer, Ph.D.
Vypracoval: Lumír Gregor

Praha 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Gregor Jméno: Lumir Osobní číslo: 317449
Fakulta/ústav: Fakulta elektrotechnická
Zadávající katedra/ústav: Katedra elektrických pohonů a trakce
Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Studijní obor: Elektroenergetika

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Model protiskluzové ochrany železničních hnacích vozidel

Název diplomové práce anglicky:

Modeling of slip protection of traction vehicle

Pokyny pro vypracování:

- 1) struktura (rozdělení) železničních trakčních vozidel
- 2) koncepční uspořádání trakčního pohonu elektrických hnacích vozidel jednosystémových (3 kV, 25 kV 50 Hz, 15 kV 16 2/3 Hz)
- 3) Princip přenosu momentu mezi kolem a koleji
- 4) Model ochrany proti skluzu

Seznam doporučené literatury:

- [1] DANZER, Jiří. Elektrická trakce. Plzeň: Západočeská univerzita, 2009. ISBN 978-80-7043-769-8.
- [2] DANZER, Jiří. Elektrická trakce II.: vozidla s asynchronním trakčním motorem, 2009. ISBN 978-80-7043-813-8.
- [3] LATA, M. - ČÁP, J. Výzkum v oblasti adheze a pohonu dvojkolí na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice. In XIX. konference s mezinárodní účastí Současné problémy v kolejových vozidlech 2009.
- [4] LATA, M. - ČÁP, J. The Reconstruction and Experimental Possibility at the Individual Driven Tram Wheel Stand. In Proceedings of the 24th International Colloquium Advanced Manufacturing and Repair Technologies in Vehicle Industry. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2007.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Bauer, Ph.D., katedra elektrických pohonů a trakce FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: 05.12.2017

Termín odevzdání diplomové práce: 09.01.2018

Platnost zadání diplomové práce: 30.09.2019

Ing. Jan Bauer, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis diktora(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 31.12.2017

.....

Lumír Gregor

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Janu Bauerovi, Ph.D. za cenné a podnětné rady a připomínky a za svědomité vedení a příkladný přístup v rámci pravidelných konzultací k mé diplomové práci. Rovněž moc děkuji své rodině za podporu po celou dobu mého studia.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá problematikou trakčních pohonů elektrických železničních hnacích vozidel z pohledu adhezních poměrů vznikajících při jízdě hnacích železničních vozidel po železniční dopravní cestě, přičemž hlavním cílem práce je sestavení modelu trakčního pohonu lokomotivy a pro něj navržení vhodného funkčního modelu protiskluzové ochrany.

Práce obsahuje základní popisy koncepčního uspořádání trakčních pohonů pro 3 typické napěťové napájecí systémy (3 kV ss, 15 kV 16 2/3 Hz a 25 kV 50 Hz), základní principy a možnosti přenosu krouticího momentu od trakčního motoru na hnací dvojkolí a v neposlední řadě i základní informace o adhezi, umožňující přenos tažné síly hnacího vozidla a tím i jeho pohyb (pohyb celého vlaku). V práci jsou též uvedeny základní informace (základní principy činnosti) týkající se protiskluzových ochranných zařízení realizovaných u hnacích železničních vozidel.

V závěru práce je uvedeno zhodnocení navrženého modelu protiskluzové ochrany elektrické lokomotivy.

Klíčová slova

Železniční trakční vozidlo, elektrická jednotka, elektrická lokomotiva, hnací dvojkolí, trakční pohon, adheze, součinitel adheze, skluzová charakteristika, tažná síla, model trakčního pohonu, protiskluzová ochrana.

Abstract

This diploma thesis deals with the issue of traction drives of electric railway drive vehicles from the point of view of the adhesion ratios arising during the ride of railway vehicles along the railway road. The main aim of this work is to build a locomotive traction drive model and to design a suitable functional antiskid protection model.

The thesis contains basic descriptions of the conceptual arrangement of traction motors for 3 typical voltage supply systems (3 kV DC, 15 kV 16 $\frac{2}{3}$ Hz and 25 kV 50 Hz), basic principles and possibilities of torque transmission from traction motor to driving wheel, basic information on adhesion, allowing for the transmission of the traction force of the powertrain and thus its movement (movement of the entire train). The thesis also provides basic information (basic principles of activity) concerning anti-slip protection realized on railway vehicles.

The conclusion of the thesis is the evaluation of the proposed anti-slip protection model of the electric locomotive.

Keywords

Railway tractive vehicle, electric trainset, electric locomotive, tractive wheelset, tractive propulsion, adhesion, coefficient of adhesion, slip characteristic, tractive force, model of tractive propulsion, anti-slip protection.

Obsah

1	Úvod	1
1.1	Cíle práce	1
1.2	Zaměření práce	1
2	Struktura (rozdělení) železničních trakčních vozidel	2
2.1	Základní pojmy z oblasti železničních vozidel	2
2.2	Rozdělení železničních trakčních vozidel	3
2.2.1	Železniční trakční vozidla - lokomotivy	5
2.2.2	Železniční trakční vozidla - jednotky	5
3	Koncepční uspořádání trakčního pohonu elektrických jednosystémových hnacích vozidel	9
3.1	Elektrické trakční pohony hnacích vozidel napájených stejnosměrnou proudovou soustavou o napětí 3 kV	10
3.2	Elektrické trakční pohony hnacích vozidel napájených střídavou proudovou soustavou o napětí 25 kV 50 Hz	14
3.3	Elektrické trakční pohony hnacích vozidel napájených střídavou proudovou soustavou o napětí 15 kV 16 2/3 Hz	16
3.4	Moderní koncepce trakčních pohonů	17
4	Princip přenosu momentu mezi kolem a kolejí	23
4.1	Adheze – základní vlastnost nutná pro pohyb kolejových vozidel	23
4.2	Pohon hnacích dvojkolí – základní způsoby provedení	29
4.3	Přenos krouticího momentu z hnacích kol na kolej	32
5	Protiskluzové ochrany použité u železničních hnacích vozidel	36
5.1	Význam protiskluzových ochran u hnacích vozidel	36
5.2	Realizace protiskluzových ochran u hnacích vozidel	38
6	Model protiskluzové ochrany lokomotivy	43
6.1	Mechanický popis soustavy trakčního pohonu	43
6.2	Technické parametry skutečného trakčního pohonu	45
6.3	Mechanický model trakčního pohonu lokomotivy	48
6.3.1	Model trakčního pohonu lokomotivy	50
6.3.2	Model zjišťování posuvné rychlosti lokomotivy	52

6.3.3	Model protiskluzové ochrany lokomotivy.....	53
6.4	Výsledky simulace s modelem protiskluzové ochrany.....	56
7	Závěr.....	61
8	Seznam použitých zkratk.....	62
9	Seznam obrázků	63
10	Seznam tabulek	65
11	Seznam použité literatury	66

1 Úvod

Hnací železniční vozidla pohybující se po železniční dopravní cestě využívají ke svému pohybu adhezi, přičemž v reálném provozu může dojít k prokluzu hnacích dvojkolí, což je nežádoucí situace, kterou je možné a zpravidla i nutné řešit pomocí tzv. protiskluzových ochran.

1.1 Cíle práce

1. Struktura (rozdělení) železničních trakčních vozidel

V rámci tohoto bodu je jednak uveden přehled několika základních pojmů včetně definic z oblasti železničních kolejových vozidel, a jednak následuje rozdělení hnacích železničních vozidel dle různých hledisek a kritérií.

2. Koncepční uspořádání trakčního pohonu elektrických jednosystémových hnacích vozidel

Tato část obsahuje základní možnosti koncepčního uspořádání trakčního pohonu jednosystémových hnacích vozidel, přičemž se bere v úvahu i typ napájecí soustavy (druh a velikost napájecího napětí).

3. Princip přenosu momentu mezi kolem a kolejí

Dalším bodem je princip přenosu momentu mezi kolem a kolejnici (kolejí), přičemž jsou zmíněna realizovaná konstrukční řešení u skutečných hnacích vozidel. Pozornost je věnována i velmi důležitému fenoménu z hlediska jízdy kolejových vozidel – tzv. adhezi, která má na vlastní jízdu nezanedbatelný vliv.

4. Protiskluzové ochrany použité u železničních hnacích vozidel

Abychom při jízdě hnacích kolejových vozidel snížili riziko klouzajících hnacích dvojkolí, jsou hnací vozidla vybavována tzv. protiskluzovou ochranou. V tomto bodě jsou zmíněny základní principy a způsoby řešení protiskluzových ochran u reálných hnacích vozidel.

5. Model protiskluzové ochrany

V tomto bodě je nejprve sestaven model trakčního pohonu elektrické lokomotivy a v rámci něj je vytvořen návrh modelu protiskluzové ochrany.

1.2 Zaměření práce

Tato práce je zaměřena na vytvoření návrhu funkčního modelu protiskluzové ochrany elektrické lokomotivy.

2 Struktura (rozdělení) železničních trakčních vozidel

2.1 Základní pojmy z oblasti železničních vozidel

Vyhláškou Ministerstva dopravy č. 173/1995 Sb. [1], ve znění pozdějších předpisů, kterou se vydává dopravní řád drah, jsou definovány některé základní pojmy z oblasti drážní dopravy (resp. drážních vozidel). Níže je citováno několik základních pojmů z vyhlášky:

*„**Drážním vozidlem** se nazývá dopravní prostředek, závislý při svém pohybu na stanovené součásti dráhy (koleji, troleji, lanu apod.) nebo v případě dráhy trolejbusové i drážní vozidlo, pohybující se vlastní silou mimo trakční vedení a napájené z nezávislého zdroje, které je primárně určeno pro jízdu při napájení z trakčního vedení; drážním vozidlem není vozidlo pro technologickou obsluhu výroby, provozované na zvláště k tomu vyhrazených kolejích vlečky, jakož i lehký dopravní prostředek, který není konstrukčně uzpůsoben pro spojování s drážními vozidly a při svém pohybu je závislý na lidské síle.*

***Hnacím drážním vozidlem** se nazývá drážní vozidlo, schopné vyvíjet tažnou, případně brzdící sílu pro pohyb a brzdění vlastní a zpravidla i jiných drážních vozidel.*

***Řídicím vozem** se nazývá drážní vozidlo bez vlastního pohonu, které je vybaveno technickým zařízením k dálkovému ovládní určených typů hnacích drážních vozidel.*

***Vedoucím drážním vozidlem** se nazývá hnací drážní vozidlo nebo řídicí vůz, ze kterého se ovládá jízda vlaku nebo drážního vozidla.*

***Vlakem** se nazývá sestavená a svěšená skupina drážních vozidel, tvořená alespoň jedním hnacím a jedním taženým drážním vozidlem, označená stanovenými návěstmi, s doprovodem vlaku a jedoucí podle jízdního řádu nebo podle pokynu odborně způsobilé osoby řídící drážní dopravu, anebo též samostatné hnací drážní vozidlo nebo speciální vozidlo s vlastním pohonem, nebo svěšená nejméně dvě hnací drážní vozidla, označená stanovenými návěstmi, s doprovodem vlaku a jedoucí podle jízdního řádu nebo podle pokynu odborně způsobilé osoby řídící drážní dopravu.“ [1]*

Kromě výše uvedených definic základních pojmů z oblasti železničních kolejových (drážních) vozidel lze nalézt v odborné technické literatuře řadu dalších podobných definic, z nichž lze uvést např. definice uvedené v [2]:

*„**Kolejové vozidlo** je v širším slova smyslu dopravní prostředek nesený a vedený dopravní cestou a tvoří významnou část pozemních dopravních prostředků, používaných k přepravě osob a nákladů, zpravidla na větší vzdálenosti a vyššími přepravními rychlostmi. Typickými vlastnostmi kolejového vozidla jsou:*

- těsná vazba s jízdni dráhou (směr jeho pohybu vozidla je definován jízdni dráhou),
- možnost spřahovat hnací vozidlo (lokomotivu, motorový vůz) s ostatními vozidly (osobní a nákladní vozy) do vlakových souprav, schopných přepravovat větší množství cestujících nebo nákladu.

Kolejová vozidla s přímým kontaktem s jízdni dráhou lze označit kolejovými vozidly v užším slova smyslu, neboť se pohybují po koleji (železniční nebo tramvajová trať) a využívají k nesení a pohybu kol, odvalujících se po kolejnici. Valení dvojkolí se vyznačuje důležitou předností kolejových vozidel, tj. nízkou hodnotou odporu valení ocelového kola po ocelové kolejnici. To umožňuje uvádět do pohybu poměrně velké hmoty relativně malými tažnými silami, přenášenými převážně adhezním způsobem. Vedení vozidla v koleji je docíleno nejen vhodnou stavbou koleje, ale i tím, že ocelová kola používají okolky.

Hnací kolejové vozidlo je vybaveno zařízením, schopným produkovat z primárního energetického zdroje mechanickou energii, potřebnou k vyvození hnací nebo brzdící síly. Je vybaveno hnacím agregátem, pomocnými zařízeními nutnými k jeho chodu (např. chlazení, startér) a pomocnými zařízeními nutnými pro správnou funkci vozidla a vlakové soupravy (energetické zdroje pro vytápění, klimatizaci, palubní síť, zdroje stlačeného vzduchu pro pneumatickou brzdu a další spotřebiče, zdroje tlakové kapaliny pro hydraulické stroje atd.).

Hnací kolejová vozidla, která si zdroj primární energie (uhlí, nafta, akumulátor) vozí s sebou, jsou **vozidla nezávislé trakce** (parní, motorová, akumulátorová). Hnací kolejová vozidla odebírající primární energii z troleje nebo z boční kolejnice, jsou **vozidla závislé trakce**, neboť bez elektrické energie nejsou schopna samostatného pohybu". [2]

V rámci **vozidel závislé trakce** lze ještě zmínit definice uvedené v [3]:

„**Elektrická lokomotiva** je hnací kolejové vozidlo napájené elektrickou energií z přírodního vedení a poháněné elektrickými trakčními motory, určené k mechanizované dopravě vlaků tahem nebo sunutím na konci vlaku.

Elektrický motorový vůz je hnací kolejové vozidlo napájené elektrickou energií z přírodního vedení a poháněné elektrickými trakčními motory, určené k přepravě užitečné zátěže, tj. cestujících a zboží, a většinou též k vleku přípojných vozů. Motorové a přípojné vozy mohou tvořit vlakové jednotky 2, 3 nebo 4 vozů, z nichž se pak sestavují soupravy – motorové vlaky – s počtem vozů, který je násobkem vozů v jednotce“. [3]

2.2 Rozdělení železničních trakčních vozidel

Kolejová vozidla lze třídit či rozdělovat podle různých hledisek, mezi něž patří např. jízdni dráha, přívod primární energie, použití, stavba mechanické části, napájecí soustava,

způsob přeměny primární energie atd. V dalším textu je uvedeno několik možností rozdělení železničních kolejových vozidel.

Kolejová vozidla s přímým kontaktem s jízdni dráhou pohybující se po koleji tvoří nejvýznamnější a nejpočetnější skupinu kolejových vozidel, která lze dále podle účelu [2] rozdělit do následujících skupin:

- železniční vozidla - hnací, tj. lokomotivy, motorové a elektrické vozy a jednotky,
 - hnaná (tažená), tj. osobní a nákladní vozy, vložené a řídicí vozy,
- kolejová vozidla pro městskou hromadnou dopravu, tj. metro, tramvaje,
- kolejová vozidla pro průmyslovou dopravu,
- speciální kolejová vozidla (traťové stroje pro výstavbu a údržbu dopravní cesty).

Z hlediska způsobu přenosu hnací síly [2] lze kolejová vozidla rozdělit na:

- konvenční vozidla s adhezním přenosem hnací síly v kontaktu kolo - kolejnice (resp. pneumatika - silnice),
- nekonvenční vozidla využívající jiné principy přenosů - vozidla ozubnicových drah, vozidla pozemní lanové dráhy atd.

Podle provozního využití [2] lze hnací kolejová vozidla rozdělit na:

- motorové a elektrické lokomotivy, tj. vozidla určená k tažení (tlačení) souprav osobních a nákladních vozů (popř. nečinných hnacích vozidel atd.),
- motorové a elektrické vozy, tj. hnací vozidla vybavená prostory pro cestující, schopná táhnout i další osobní (přípojné) vozy,
- motorové a elektrické jednotky, tj. ucelené soupravy motorových a elektrických vozů s vloženými osobními vozy, přičemž v některých případech může být na jednom konci jednotky místo hnacího vozu použit vůz řídicí,
- vysokorychlostní jednotky, tj. jednotky určené pro dopravu cestujících na velké vzdálenosti rychlostmi vyššími než $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,
- elektrická vozidla městské hromadné dopravy, tj. vozy metra, rychlodrážní a městské tramvaje,
- speciální hnací kolejová vozidla, tj. vozidla s vlastním pohonem pro potřeby výstavby, rekonstrukce, měření, oprav a údržby dopravní cesty.

U hnacích železničních vozidel elektrické (závislé) trakce podle toho, na jakém napájecím napěťovém systému je schopno hnací kolejové vozidlo vyvíjet tažnou sílu [2], potom rozeznáváme vozidla:

- **jednosystémová** (1 napájecí systém, např. stejnosměrný napájecí systém 3 kV ss, nebo např. střídavý napájecí systém 25 kV 50 Hz),
- **dvousystémová** (2 napájecí systémy, např. 3 kV ss a 25 kV 50 Hz),
- **vícesystémová** (více než 2 napájecí systémy, např. systémy 3 kV ss, 15 kV 16 $\frac{2}{3}$ Hz a 25 kV 50 Hz).

2.2.1 Železniční trakční vozidla - lokomotivy

Lokomotivy jsou železniční trakční vozidla [4] (Obr. 1), která jsou výhradně určena pouze pro trakční účely, tj. především k vyvíjení potřebné tažné (brzdné) síly k tažení (tlačení) vlakové soupravy (a ne pro přepravu cestujících nebo zboží přímo na lokomotivě).



Obr. 1 Elektrická třísystemová lokomotiva ČD řady 380 (typ 109 E ŠKODA)

Staví se pro nejrůznější specializované účely (lokomotivy určené pro využití v osobní dopravě, pro využití v nákladní dopravě, dále i pro staniční posun především ve větších železničních stanicích či v DKV nebo na vlečkách) nebo naopak jako univerzální pro co nejširší použití. K typickým znakům lokomotiv patří [4]:

- jsou určeny výhradně pro tažení (sunutí) vlaků,
- mají úplné oddělení prostoru pro trakční zařízení s obsluhou od přepravovaných cestujících či zboží,
- vysoká koncentrace výkonu často vede k prostorovým, hmotnostním a adhezním potížím,
- výkony a rychlosti lokomotiv představují velmi širokou škálu, čemuž odpovídá i velká pestrost jejich konstrukčních provedení.

2.2.2 Železniční trakční vozidla - jednotky

Jednotky jsou určeny pro provoz na železničních tratích jednak v okolí velkých průmyslových center (příměstská a předměstská doprava), jednak pro obsluhu přilehlých

regionů (regionální doprava), a jednak k rychlému spojení vzdálených velkých měst uvnitř státu (vnitrostátní dálková doprava) a mezi sousedními státy (mezinárodní dálková doprava).

Jednotky pro příměstskou (předměstskou) dopravu [4] (Obr. 2) jsou určeny především k rychlému a častému spojení velkých městských aglomerací s přílehlým okolím, tj. k dopravě osob do zaměstnání, do škol, za kulturou atd. a k jejich následnému rozvozu z města zpět do jejich domovů.



Obr. 2 Elektrická jednosystémová (3 kV ss) jednotka ČD řady 471

Hlavními znaky jednotek pro příměstskou (předměstskou) dopravu jsou [4]:

- dosažení maximálního přepravního výkonu (s ohledem na délku nástupišť se proto staví také jako dvoupodlažní),
- většinou se jedná o ucelené vlaky, násobně řízené z koncových vozidel (motorových nebo řídicích),
- vlak může být pro dosažení potřebné variability v závislosti na kolísání přepravní frekvence v průběhu dne složen z několika dále provozně nedělitelných jednotek,
- výška podlahy vozidel v místě nástupu je přizpůsobena výšce nástupišť, která jsou na příslušných tratích zpravidla jednotná,
- vysoká hmotnost jednotek (zejména dvoupodlažních) a dynamika jízdy vyžaduje velmi značné výkony pro režim jízda i brzda; z adhezních důvodů je také žádoucí velký podíl hnacích náprav, přičemž zatížení náprav se pohybuje blízko maximálních dovolených hodnot s ohledem na dovolené zatížení železniční dopravní cesty,
- vozidla musí vyhovovat všem železničním předpisům (rozměry, pevnost, napájení, trolej atd.),

- elektrická výzbroj může být uložena pod podlahou nebo i na střeše; v případě dvoupodlažních jednotek je nutno ji umístit především ve strojvážkách, čímž se zmenšuje prostor vyhrazený pro cestující,
- řízení vozidla, provozu jako celku a jeho zabezpečení je obdobné jako pro ostatní vlaky na daném úseku (trati mohou být vybaveny pro náročnější automatizaci řízení).

Jednotky pro regionální dopravu [4] (Obr. 3) mají za úkol zajišťovat rychlou osobní dopravu cestujících v rámci daného regionu a též i mezi sousedními regiony, popř. i na delší vzdálenosti, především na méně zatížených tratích.

Hlavními znaky jednotek určených pro regionální dopravu jsou [4]:

- minimální hmotnost a co nejjednodušší stavba z důvodu vysoké dynamiky jízdy (krátké jízdní a cestovní doby),
- nízká podlaha pro usnadnění nástupu a výstupu cestujících na zastávkách na vedlejších tratích bez vybudovaných nástupišť,
- odpovídající vybavení prostorů pro cestující a dostatečné prostory pro dopravu zavazadel (rekreační provoz, jízdní kola, lyže),
- minimální potřebný výkon při vhodně volené maximální rychlosti a dynamice.



Obr. 3 Elektrická dvousystémová jednotka ČD řady 660

Jednotky pro dálkovou dopravu [4] (Obr. 4) představují nejrychlejší a zároveň nejspecifičtější druh železničních vozidel. Jejich maximální rychlosti se pohybují v rozmezí od $220 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ výše a v některých aspektech přebírají prvky charakteristické pro letadla. Pro

rychlosti poblíž dolní uvedené hranice stáčí upravené (modernizované) stávající trati, pro vyšší rychlosti se staví zcela nové speciální vysokorychlostní trati se značně odlišnými parametry, které využívají původní železniční sítě především v oblasti velkých měst. Společná nádraží v centru měst představují významnou výhodu v porovnání s dopravou leteckou.

Hlavními znaky jednotek určených pro dálkovou dopravu jsou [4]:

- výhradně použití ucelených, přísně aerodynamicky řešených souprav (při vyšších rychlostech se enormně zvyšuje odpor vzduchu),
- vysoký výkon, rozdělený rovnoměrně na většinu náprav s ohledem k adhezi, snižující se s rychlostí, a také s ohledem na možnost elektrického brzdění (provozní brzdění mechanickou brzdou není v oblasti vysokých rychlostí prakticky možné),
- vysoký komfort prostorů pro cestující, tlakotěsné provedení skříní vozidel,
- speciální zabezpečovací zařízení jízdy vzhledem k dlouhým zábrzdým vzdálenostem.



Obr. 4 Elektrická třísystemová jednotka s naklápěcí skříní ČD řady 680

V následující kapitole je uveden informativní přehled trakčních pohonů elektrických hnacích vozidel na nejběžněji používaných napěťových napájecích systémech.

3 Koncepční uspořádání trakčního pohonu elektrických jednosystémových hnacích vozidel

Elektrický pohon vozidel byl použit již na konci 19. století především v městské hromadné dopravě (tramvaje a trolejbusy), u městských rychlých a podzemních drah a též v báňské (důlní) dopravě (povrchové i podpovrchové), přičemž byly použity napájecí systémy stejnosměrných proudových soustav o napětí 250 V, 600 V, 750 V a 1500 V. Uplatnění elektrického pohonu (elektrické trakce) u konvenčních normálněrozchodných železničních vozidel (pohybujících se po konvenční železniční dráze tvořené dvěma kolejnicovými pásy normovaných tvarů a rozměrů), u nichž se požadoval několikanásobně větší výkon než u vozidel městských drah, a přenos velkých výkonů trakčním vedením na vzdálenosti několika set (i tisíc) km, byl podmíněn technickým vyřešením 3 základních problémů [5]:

- trakčního motoru s pohonem hnacích náprav, s vhodnou regulací rychlosti a tažné síly,
- výroby a přenosu elektrické energie,
- přívodu elektrické energie do hnacího vozidla nepřetržitě během jízdy vozidla.

Tyto problémy souvisí s vhodnou volbou proudové napájecí soustavy, s přívodem energie na větší vzdálenosti a s možností napájení z vlastní nebo všeobecné energetické sítě. Podle stupně technického vývoje se v jednotlivých zemích řídila volba celé energetické a trakční proudové soustavy. Postupně vznikly různé trakční proudové soustavy, které se zachovaly až do současnosti, přičemž se neustále zdokonalovaly tak, že jsou na stejné úrovni jak z hlediska spolehlivosti, tak i energetické hospodárnosti. Liší se jen v pořizovacích a provozních nákladech, které jsou závislé na hustotě dopravy.

V Evropě jsou v současné době nejrozšířenější tyto trakční napájecí systémy [5]:

- **stejnosměrné proudové soustavy o napětí 3 kV** napájené z trojfázové sítě vn s přeměnou proudové soustavy v měnících (např. Česko, Slovensko, Polsko, Itálie, Španělsko, Belgie atd.),
- **střídavé jednofázové soustavy sníženého kmitočtu o napětí 15 kV 16 $\frac{2}{3}$ Hz** s vlastní výrobou a rozvodem jednofázovým vvn nebo s přeměnou trojfázové proudové soustavy kmitočtu 50 Hz na jednofázovou sníženého kmitočtu (např. Německo, Švýcarsko, Švédsko, Norsko a Rakousko atd.),
- **střídavé jednofázové soustavy 25 kV 50 Hz** napájené z všeobecné energetické sítě transformací napětí a štěpením fází (např. Česko, Slovensko, Maďarsko, Bulharsko, Portugalsko atd.)

Prudký rozvoj elektrifikace železnic na celém světě zejména po 2. světové válce způsobil, že bylo vyvinuto mnoho typů elektrických hnacích vozidel, jimiž se ověřovaly nové směry v koncepci, konstrukci, výrobní technologii i v údržbě. Pro pohon hnacích vozidel elektrické trakce se téměř celé století používaly komutátorové motory pro jejich výhodnou trakční charakteristiku a vhodné regulační vlastnosti. Volba typu trakčního motoru vycházela z požadovaných trakčních vlastností kladených na trakční motor. Z požadavku konstantního výkonu vozidla potom vycházela požadovaná momentová charakteristika a z ní trakční charakteristika, tj. v ideálním případě hyperbolická závislost tažné síly na rychlosti [6]. Dalším požadavkem na trakční pohon byly dynamické a regulační vlastnosti, které ideálně splňovaly komutátorové motory v provedení stejnosměrného motoru se sériovým buzením (dále jen "sériový motor") napájeného ze stejnosměrné sítě nebo v provedení jednofázového sériového motoru napájeného z jednofázové střídavé sítě se sníženým kmitočtem $16 \frac{2}{3}$ Hz. Oba typy motorů dlouhodobě zaujaly v trakčních pohonech dominantní postavení. S rozvojem polovodičové techniky se v trakčních pohonech začaly prosazovat asynchronní motory a své uplatnění postupně nacházejí i synchronní stroje s permanentními magnety.

V dalším textu jsou uvedeny základní informace o koncepčním uspořádání trakčních pohonů používaných na elektrických jednosystémových hnacích vozidlech. U hnacích vozidel vícesystémových bývají koncepce trakčních pohonů zpravidla velmi podobné koncepcím vozidel jednosystémových, přičemž existují i případy, kdy se u jednosystémových vozidel vychází z koncepce použité nejprve u vozidel vícesystémových (vynecháním trakční výzbroje nutné pro provoz vícesystémového hnacího vozidla na dalším napěťovém systému a provedením dalších nezbytných úprav). V České republice se jedná např. o elektrické dvousystémové lokomotivy řady 363, resp. 362 (tovární označení 69 E) a z nich následně odvozené jednosystémové lokomotivy stejnosměrné trakce řady 163, resp. 162 (tovární označení 71 E) a jednosystémové lokomotivy střídavé trakce řady 263 (tovární označení 70 E). Obdobně platí např. i v případě dvousystémové lokomotivy řady 350 (tovární označení 55 E) provozované ve Slovenské republice, z níž jsou odvozené jednosystémové lokomotivy stejnosměrné trakce řady 150, resp. 151 (tovární označení 65 E).

3.1 Elektrické trakční pohony hnacích vozidel napájených stejnosměrnou proudovou soustavou o napětí 3 kV

Elektrická hnací vozidla stejnosměrných proudových soustav jsou po elektrické stránce v případě použití klasické kontaktní spínací a regulační techniky ze všech trakčních proudových soustav nejjednodušší a mají velmi dobré trakční a regulační vlastnosti. Tyto okolnosti byly rozhodující pro volbu stejnosměrných proudových soustav, přičemž použití přímo napájeného trakčního motoru a ochranné vypínače v napájecí síti a v trakčních vozidlech byly omezujícími prvky pro volbu velikosti napájecího napětí. Aby se snížilo napětí

na komutátorech motorů, používají se trakční motory zpravidla na poloviční napětí oproti napětí napájecímu v trolejovém vedení. U hnacích vozidel starší generace napájených stejnosměrnou proudovou soustavou o napětí 3 kV jsou pro pohon používány stejnosměrné sériové trakční motory, u nichž lze regulaci otáček (úhlové rychlosti) sériového motoru provádět [5]:

- snížováním svorkového napětí úbytkem napětí v předřadných rezistorech,
- dělením napětí skupinovým řazením trakčních motorů,
- změnou napájecího napětí,
- změnou buzení.

Regulace rychlosti předřadnými (rozjezdovými) rezistory [5] se u hnacích vozidel stejnosměrné proudové soustavy (Obr. 5) používá pouze pro vlastní rozjezd hnacích vozidel napájených z přívodního vedení téměř konstantním napětím, protože se z energetického hlediska jedná o regulaci ztrátovou (nehodí se pro trvalý provoz). Odporová regulace otáček umožňuje spouštění motoru z klidu a zvyšování otáček libovolným proudem a tím volitelným momentem (tažnou silou) až do rychlosti omezené otáčkovou charakteristikou při plném napětí motoru. K udržení konstantního (předem zvoleného) proudu v trakčním motoru během jeho spouštění je při vzrůstající rychlosti potřeba postupně zvyšovat napětí přiváděné do motoru, což je dosaženo snížováním hodnoty předřadného (rozjezdového) rezistoru zařazeného do obvodu napájení motoru. Spínáním odporových stupňů vznikají odpovídající změny v proudech, které jsou tím větší, čím je menší počet stupňů (odstupňování rezistorů je méně přizpůsobeno vzrůstajícímu indukovanému napětí spouštěného motoru). Odstupňování předřadných rezistorů se proto volí tak, aby se při rozjezdu proud udržoval v určitých mezích, aby tažná síla při přechodu ze stupně na stupeň nepřekročila adhezi hnacích kol a kolísání proudu na stupních bylo pravidelné až do plného napětí na motoru.

Regulace rychlosti dělením napětí [5] se zajišťuje skupinovým řazením trakčních motorů, přičemž tato dělba napětí je rovnoměrná pro všechny motory pouze tehdy, když mají stejné otáčky, stejné buzení a stejné charakteristiky. Při skluzu dochází k narušení rovnoměrné dělby napětí. Obvykle se provádí skupinové řazení motorů jen ve 2 stupních, tj. motory jsou nejprve všechny řazeny do série a potom do dvou skupin sérioparalelně (charakteristiky rychlostí na hospodárných stupních se dělí v poměru 1 : 2). U lokomotiv se 6 trakčními motory (hnacími nápravami) je možné řadit trakční motory ve 3 stupních při plném napětí (charakteristiky rychlostí na hospodárných stupních se dělí v poměru 1 : 2 : 3).

Regulace rychlosti změnou napájecího napětí [5] se u hnacích vozidel stejnosměrné proudové soustavy neprovádí, protože hodnota napájecího napětí v trakčním vedení se nemění a má stále stejnou velikost (s povolenými odchylkami).

Regulace rychlosti změnou (zeslabováním) buzení [5] je hospodárná (hodí se pro trvalý provoz), umožňuje zvyšovat rychlost nebo při nezměněné rychlosti zvětšovat krouticí

moment při konstantním svorkovém napětí. Zeslabování buzení se obvykle provádí zařazením bočního rezistoru paralelně k budicímu vinutí, takže jím protéká část trakčního proudu motoru, o kterou se zeslabuje proud protékající budicím vinutím motoru. U motorů napájených z trakčního vedení, ve kterém může docházet ke kolísání hodnoty napětí a mohou se vyskytovat přechodné napěťové jevy způsobené spínáním proudu, změnami zatížení až zkraty, musí být do série s bočním rezistorem zařazena tlumivka se železem, aby i při přechodných dějích bylo zajištěno rovnoměrné rozdělení proudu do budicího vinutí i do obvodu s bočním rezistorem. Pokud by se paralelně k budicímu vinutí motoru zařadil pouze samotný rezistor, ztratil by trakční motor největší část své indukčnosti, která účinně tlumí přechodné proudové jevy v motoru při spínacích pochodech (spouštění, skupinové spínání a zeslabování buzení) a motor by byl více náchylný k přejiskření při spínacích pochodech.

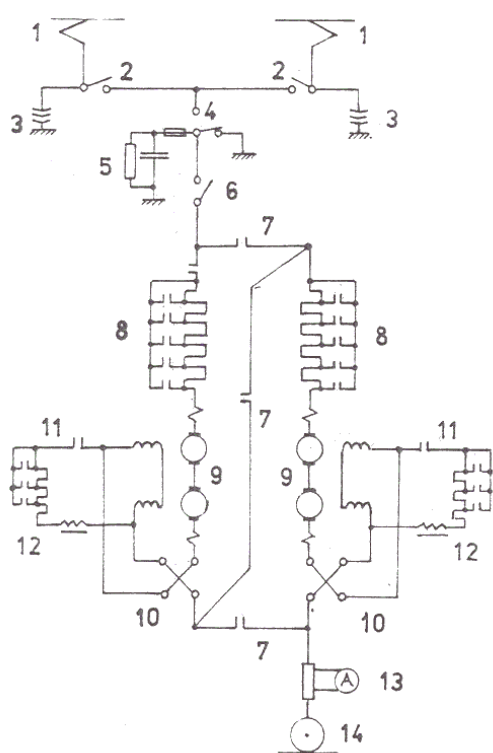


Schéma hlavních obvodů
 1 - sběrač, 2 - odpojovače, 3 -
 přepětový svodič, 4 - územnění,
 5 - přepětová ochrana, 6 - hlavní
 vypínač, 7 - prepínání zapojení,
 8 - rozjezdové odpory, 9 - trakční
 motory, 10 - měnič směru jízdy,
 11 - šuntovací odpory, 12 - tlumiv-
 ky, 13 - měřicí přístroje, 14 -
 obvod dvojkolí

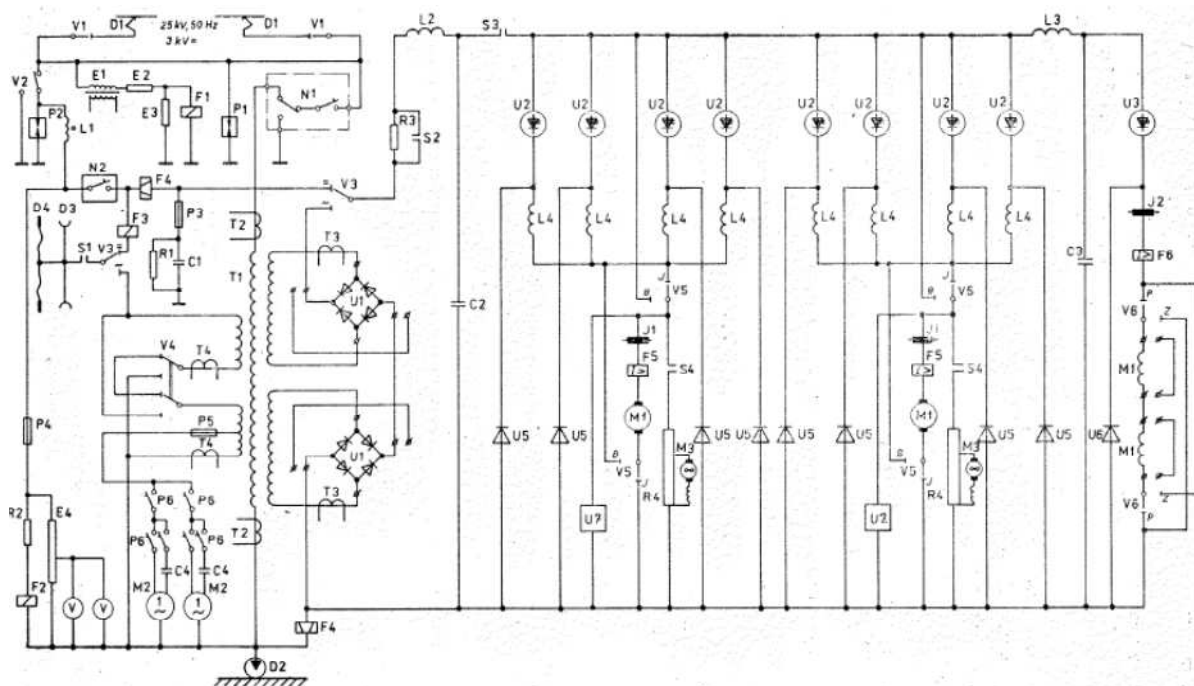
Obr. 5 Zjednodušené schéma zapojení trakčních obvodů hnacího vozidla s předřadnými (rozjezdovými) rezistory

Při rozjezdu hnacího vozidla byly trakční motory nejprve všechny řazeny do série se zařazeným celým (plnou hodnotou) předřadným (rozjezdovým) rezistorem (Obr. 5), který se v závislosti na zvyšující se rychlosti postupně vyřazoval (snižovala se hodnota odporu), až při jeho úplném vyřazení bylo dosaženo hospodárného stupně (bez předřadného rezistoru). Další zvyšování rychlosti bylo umožněno zeslabováním buzení (zpravidla ve 3 až 5 stupních). Poté byla v rámci přechodového stupně provedena změna sériového spojení trakčních motorů na sérioparalelní spojení, přičemž do obvodu byl zařazen celý předřadný rezistor, který se opět se zvyšující rychlostí vyřazoval, až bylo opět dosaženo hospodárného

stupně v sérioparalelním spojení trakčních motorů. Následovala další možnost zvyšovat rychlost vozidla pomocí zeslabování buzení (zpravidla ve 3 až 5 stupních).

V souvislosti s výrazným rozvojem polovodičů a polovodičových součástek a jejich uplatněním v polovodičových měničích (včetně rozvoje mikroelektroniky) došlo i ke změně koncepce regulace trakčního pohonu u hnacích vozidel. Stejnosemné sériové trakční motory byly nahrazeny trakčními motory stejnosměrnými s cizím buzením, které mají lepší dynamické vlastnosti uplatněné při zavádění automatického řízení a při řízení elektrodynamické brzdy, a místo předřadných (rozjezdových) rezistorů jsou použity pulzní měniče, čímž se podařilo odstranit energetické ztráty vznikající v předřadných rezistorech a stupňovitou regulaci tažné síly při rozjezdu.

Regulace trakčního pohonu pomocí pulzních měničů [6] (Obr. 6) ve srovnání s regulací pomocí předřadných rezistorů představuje snížení spotřeby elektrické energie (zejména při častých rozjezdech hnacího vozidla), kratší dobu trvání proudových špiček při spouštění a menší proudy při jízdě sníženou rychlostí, zanedbatelné zvlnění odběrových proudů a lepší adhezní poměry vlivem plynulé regulace tažné síly hnacího vozidla.



Obr. 6 Zjednodušené schéma zapojení trakčních obvodů dvousystémového hnacího vozidla s pulzními měniči

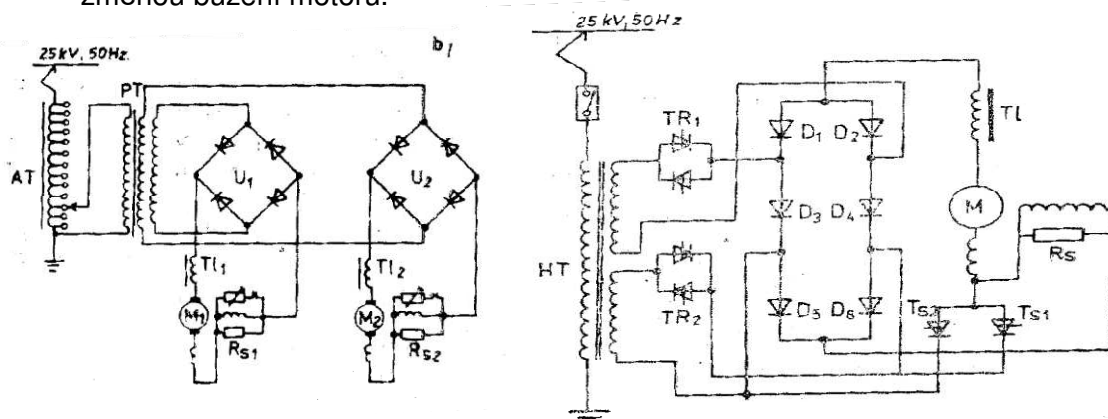
U lokomotiv s pulzními měniči (Obr. 6) jsou budicí vinutí všech trakčních motorů spojena do série a napájena jediným společným měničem buzení. Kotevní pulzní měniče napájejí vždy 2 v sérii spojené kotvy trakčních motorů přes vyhlazovací tlumivky, přičemž jejich jednotlivé fáze jsou vzájemně přesazené. Proudů jednotlivých větví pulzních měničů jsou aritmeticky sčítány, takže střední hodnota proudu jedné větve představuje polovinu proudu protékajícího trakčním motorem. Budicí i kotevní pulzní měniče jsou tvořeny především

tyristory a diodami s integrovaným olejovým chladičem a nutnými komutačními obvody, přičemž řídicí impulsy pro zapínání tyristorů jsou zadávány regulátorem tahu, který dostává vstupní signály prostřednictvím ovládací páky od strojvedoucího, z centrálního řídicího členu a z protiskluzové ochrany. Centrální řídicí člen zajišťuje spolupráci regulátoru rychlosti, řídicí elektroniky hlavních obvodů a protiskluzové ochrany s ovládacími obvody vozidla. Průběhy rozjezdových proudů tekoucích trakčními motory jsou řízeny spínáním tyristorů v pulzních měničích, které je závislé na dynamických vlastnostech tyristorů pro určitou pracovní frekvenci. S přihlédnutím k legislativě a negativním vlivům na jiná elektrická zařízení (např. kolejové obvody atd.) byly zvoleny pracovní frekvence o velikosti $33\frac{1}{3}$ Hz, 100 Hz a 300 Hz.

3.2 Elektrické trakční pohony hnacích vozidel napájených střídavou proudovou soustavou o napětí 25 kV 50 Hz

U hnacích vozidel starší generace napájených jednofázovou střídavou proudovou soustavou o napětí 25 kV 50 Hz se používají stejnosměrné trakční motory upravené pro napájení napětím, které se získává dvojpulsním usměrněním napájecího napětí z trakčního vedení [5]. Přestože je usměrněný proud ještě vyhlazován vyhlazovacími tlumivkami nebo indukčnostmi v obvodu trakčních motorů, zůstává v trakčním proudu určitá vlnivá složka. Tyto trakční motory se označují jako motory na smíšený proud (protékající vlnivý proud lze rozložit na stejnosměrnou a střídavou složku, sloučením obou složek vzniká smíšený proud). Motor na smíšený proud se chová jako motor stejnosměrný. Regulace otáček u těchto motorů je možná těmito způsoby (Obr. 7) [5]:

- změnou napájecího napětí,
- změnou buzení motoru.



Obr. 7 Zjednodušené schéma zapojení trakčních obvodů hnacího vozidla s transformátorem a usměrňovači

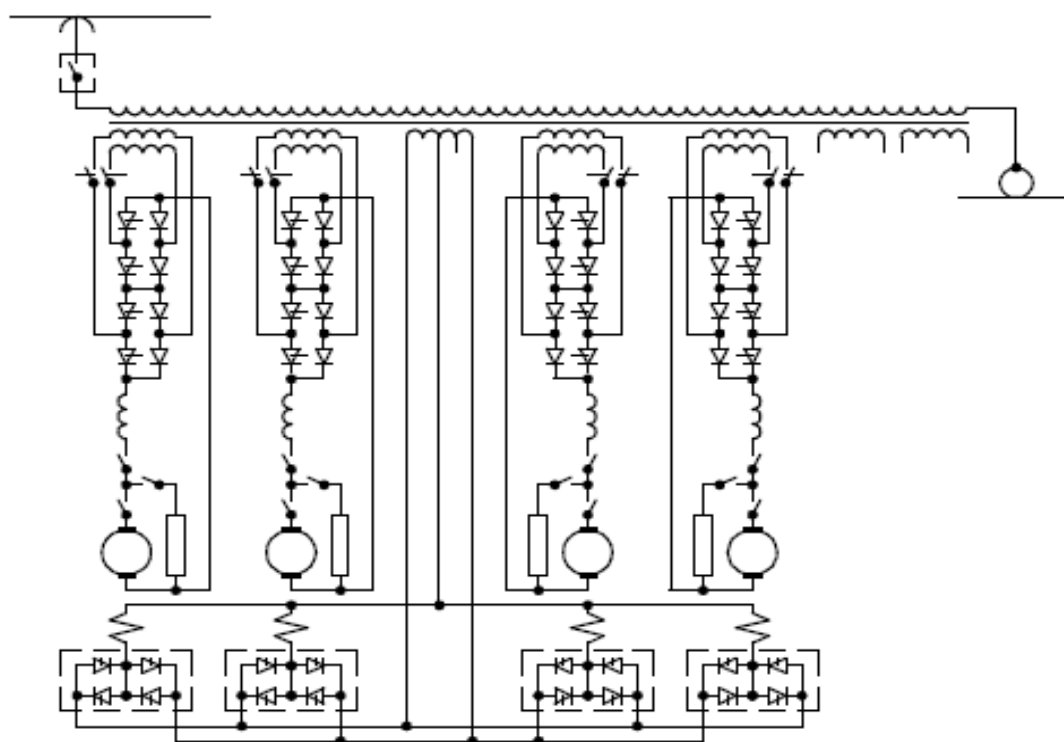
Regulace rychlosti změnou napájecího napětí [5] motoru se oproti stejnosměrným sériovým motorům, u kterých bylo jejich spouštění možné zejména předřadnými rezistory, může provést hospodárně – jednak změnou převodového poměru transformátoru pomocí přepínače odboček na primárním vinutí ve spojení s diodovým můstkovým usměrňovačem

(amplitudová regulace), a jednak změnou fázového úhlu (úhlu otevření) tyristorového usměrňovače připojeného k transformátoru s pevným převodem (fázová regulace).

Regulace rychlosti změnou (zeslabováním) buzení se provádí stejně jako u hnacích vozidel stejnosměrné trakce zařazením bočního rezistoru paralelně k budicímu vinutí. [5]

Vzhledem k tomu, že jednotlivé jízdní (napěťové) stupně (získané amplitudovou nebo fázovou regulací) jsou vždy hospodárné, není potřeba využívat pro regulaci výkonu lokomotiv řazení trakčních motorů do skupin.

Obdobně jako u hnacích vozidel stejnosměrné trakce se i u hnacích vozidel střídavé trakce uplatnily polovodičové měniče, čímž došlo i ke změně jejich koncepce trakčního pohonu. Stejnosměrné sériové trakční motory byly nahrazeny stejnosměrnými trakčními motory s cizím buzením a k regulaci otáček motorů jsou použity pulzní měniče. [6], [7]



Obr. 8 Zjednodušené schéma zapojení trakčních obvodů hnacího vozidla s pulzními měniči

U lokomotiv s pulzními měniči (Obr. 8) je budicí vinutí každého trakčního motoru napájeno samostatným reverzačním fázově řízeným měničem, přičemž jednotlivé měniče jsou vzájemně zapojené paralelně na společné sekundární vinutí trakčního transformátoru. Každá kotva trakčního motoru je napájena samostatným kotevním měničem napájeným vždy ze 2 sekcí sekundárního vinutí trakčního transformátoru. V obvodu kotvy každého trakčního motoru je zařazena vyhlazovací tlumivka. Proudy jednotlivých větví pulzních měničů jsou aritmeticky sčítány, takže střední hodnota proudu jedné větve představuje polovinu proudu protékajícího trakčním motorem. Budicí i kotevní pulzní měniče jsou tvořeny především tyristory a diodami s integrovaným olejovým chladičem a nutnými komutačními obvody,

přičemž řídicí impulsy pro zapínání tyristorů jsou zadávány regulátorem tahu, který dostává vstupní signály prostřednictvím ovládací páky od strojvedoucího, z ústředního řídicího členu a z protiskluzové ochrany. Průběhy rozjezdových proudů tekoucích trakčními motory jsou řízeny spínáním tyristorů v pulzních měničích, které je závislé na dynamických vlastnostech tyristorů pro určitou pracovní frekvenci. S přihlédnutím k platným předpisům a negativním vlivům na jiná elektrická zařízení (např. kolejové obvody atd.) byly zvoleny pracovní frekvence o velikosti $33\frac{1}{3}$ Hz, 100 Hz a 300 Hz. [6], [7]

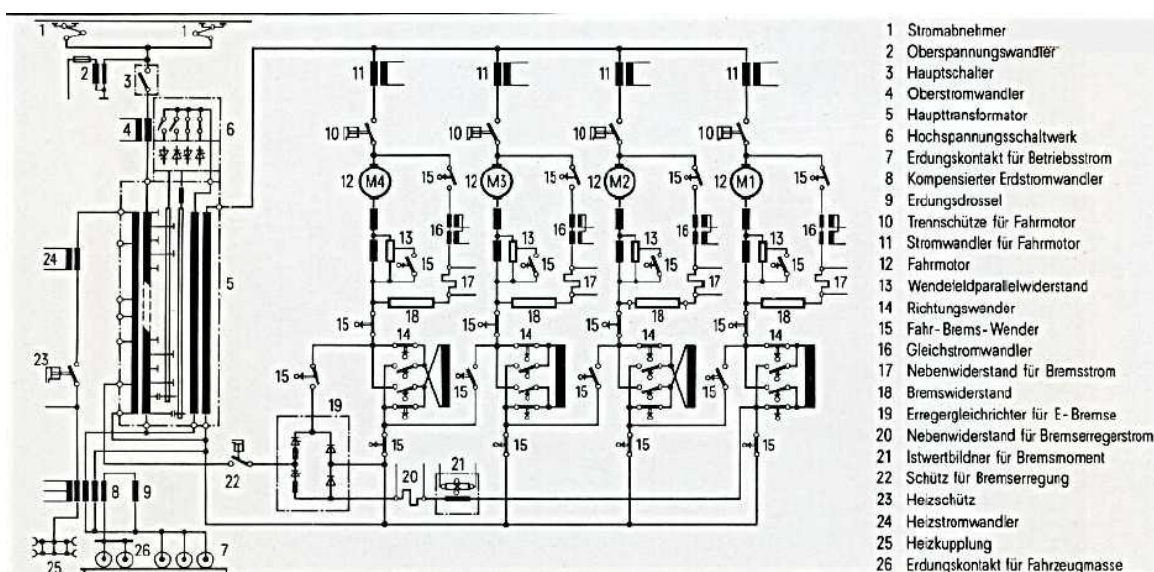
3.3 Elektrické trakční pohony hnacích vozidel napájených střídavou proudovou soustavou o napětí 15 kV $16\frac{2}{3}$ Hz

U hnacích vozidel starší generace napájených jednofázovou střídavou proudovou soustavou o napětí 15 kV $16\frac{2}{3}$ Hz se používají sériové komutátorové trakční motory [5], které lze napájet stejnosměrným i střídavým proudem. Při napájení střídavým proudem se současně střídá polarita kotvy i hlavních pólů, takže zůstává zachován směr otáčení i krouticího momentu. Střídavý sériový motor má podobné otáčkové i momentové charakteristiky jako stejnosměrný sériový motor, tj. při stálém svorkovém napětí jsou otáčky nepřímo závislé na zatížení a krouticí moment je nezávislý na napětí, přičemž v magneticky nenasyceném stavu při malém zatížení výrazně stoupá úměrně s druhou mocninou proudu a ve stavu nasyceném přechází v lineární závislost na proudu. Střídavý sériový motor je necitlivý na náhlé změny napětí a je momentově značně přetížitelný. Volba sníženého kmitočtu napájecího napětí motorů vycházela z podmínky dosažení přijatelné komutace motorů. S komutací též souvisí omezení maximální tažné síly při rozjezdu hnacího vozidla z klidu (zejména se zátěží velké hmotnosti), kdy hrozí velké riziko přejiskření a rovněž i velkého oteplení kartáčů.

U elektrických hnacích vozidel napájených střídavou proudovou soustavou o napětí se sníženým kmitočtem 15 kV $16\frac{2}{3}$ Hz lze snadno a hospodárně měnit napětí motorů pomocí odboček na trakčním transformátoru, čímž lze regulovat rychlost hnacího vozidla z klidu až do maximální rychlosti bezztrátově (bez ztrát v předřadných rezistorech), bez spínání motorů do motorových skupin a bez zeslabování buzení. Jednofázový sériový trakční motor má vlivem nižšího napětí a tím větších proudů na komutátoru větší ztráty přechodovým odporem a v odporovém bočníku připojeném k vinutí pomocných pólů přídavné ztráty, které stejnosměrný sériový motor nemá.

V rámci České republiky se tato napájecí soustava v současné době vyskytuje pouze na krátkém traťovém úseku Retz (ÖBB) – Znojmo, na němž jsou nasazeny vratné soupravy ÖBB (tzv. push-pull soupravy) pro zajištění mezistátní regionální dopravy mezi ÖBB a ČD.

Pro ilustraci je na Obr. 9 znázorněno principiální schéma zapojení hlavních obvodů elektrické jednosystémové lokomotivy DB řady 111.

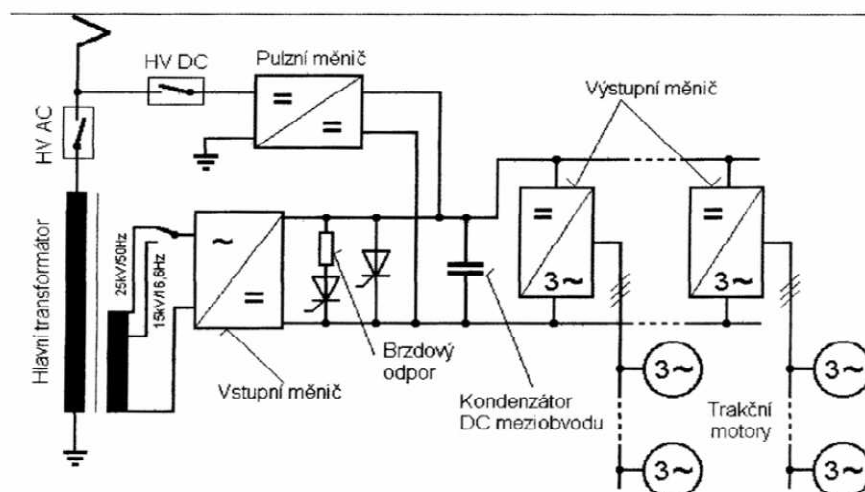


Obr. 9 Schéma hlavních obvodů lokomotivy DB řady 111

3.4 Moderní koncepce trakčních pohonů

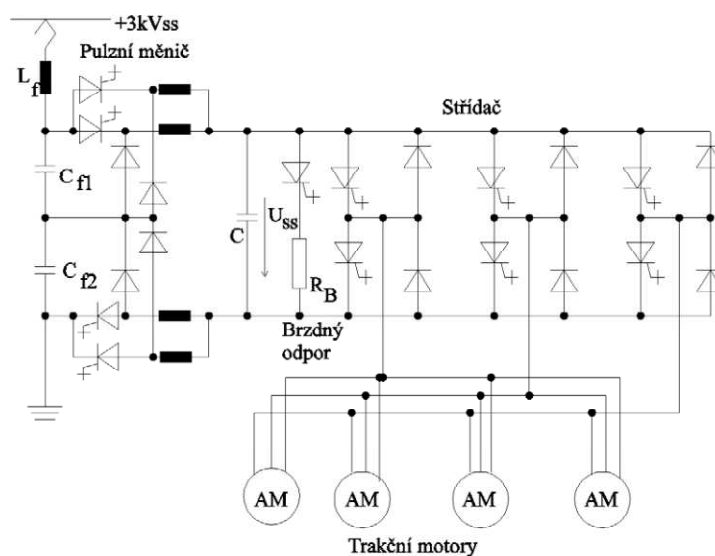
U hnacích vozidel se stejnosměrnými trakčními motory se průběžně provádějí různé stupně modernizací včetně elektrické výzbroje vozidel spočívající v modernizovaném regulačním systému s novými pulzními měniči v modulovém provedení, osazených místo klasických tyristorů s nezbytnými komutačními (zhášecími) obvody novými vypínatelnými prvky (např. tyristory GTO, IGCT a tranzistory IGBT), čímž se nové měniče podstatně zjednodušily a rozměrově zmenšily. Do dnešní doby se však nepodařilo úspěšně zvládnout vlastní komutační jevy stejnosměrných strojů (největší problém představuje mechanický usměrňovač (rotační střídač) neboli komutátor). Tato negativní vlastnost stejnosměrných strojů zejména s ohledem na vývoj nových konstrukcí elektrických strojů a polovodičové techniky v posledních letech způsobila přechod na zcela novou koncepci trakčního pohonu spočívající v použití strojů bezkomutátorových (asynchronních i synchronních) náhradou za původně používané elektrické stejnosměrné komutátorové stroje (Obr. 10).

Moderní koncepce trakčního pohonu (Obr. 10, 11) spočívá v použití bezkomutátorového stroje (asynchronního s kotvou nakrátko, příp. synchronního) a frekvenčního měniče (zpravidla napětového typu), ve kterém dochází (téměř bezztrátově) k vlastní přeměně elektrické energie [6].



Obr. 10 Zjednodušené schéma zapojení trakčních obvodů třísystemového hnacího vozidla s asynchronními motory

Ve srovnání s elektrickými komutátorovými motory je hlavní předností asynchronního motoru jeho jednoduchá konstrukce a menší geometrické rozměry [6], neboť jen samotný komutátor u stejnosměrného motoru zabírá téměř jednu třetinu jeho celkové délky, což je významným aspektem z hlediska prostorového uložení trakčního motoru v rámu podvozku hnacího vozidla. Další velkou výhodou asynchronního motoru je jeho momentová a proudová přetížitelnost a z ekonomického hlediska též jeho nižší výrobní cena a zejména podstatně méně náročná údržba. Před nástupem polovodičových měničů a jejich využití v oblasti elektrických pohonů zůstávala velkou nevýhodou asynchronních motorů nemožnost u něj jednoduchým a bezztrátovým způsobem plynule regulovat otáčky. Tehdejší regulační prostředky neumožňovaly dosáhnout srovnatelných regulačních vlastností jako u motorů komutátorových.



Obr. 11 Zjednodušené schéma zapojení trakčních obvodů hnacího vozidla s asynchronními motory

Vlastní hlavní (silový) obvod trakčního pohonu (Obr. 11) sestává ze stejnosměrného napěťového meziobvodu, který tvoří vyhlazovací kondenzátor C. Napěťový meziobvod je napájen přes vstupní filtr a vstupní pulzní měnič (usměrňovač) regulující požadovanou hladinu napětí. Paralelně ke stejnosměrnému meziobvodu bývá připojen i brzdový obvod tvořený pulzním měničem a brzdovým rezistorem, který odebírá energii při generátorickém chodu asynchronního motoru, popř. může být tato energie rekuperací dodávána zpět do trakčního vedení ke spotřebě jiným hnacím vozidlem. Za meziobvodem je zapojen střídač sestávající z vypínatelných prvků (GTO, IGCT, IGBT), k nimž jsou antiparalelně připojeny diody, přes které se uzavírá doznívající proud při přepínání spínacích prvků, popř. působí jako usměrňovače při zpětném toku energie z motoru do meziobvodu.

Při napájení vozidla ze stejnosměrné napájecí proudové soustavy (3 kV ss) je napětí ve stejnosměrném meziobvodu regulováno vstupním pulzním měničem.

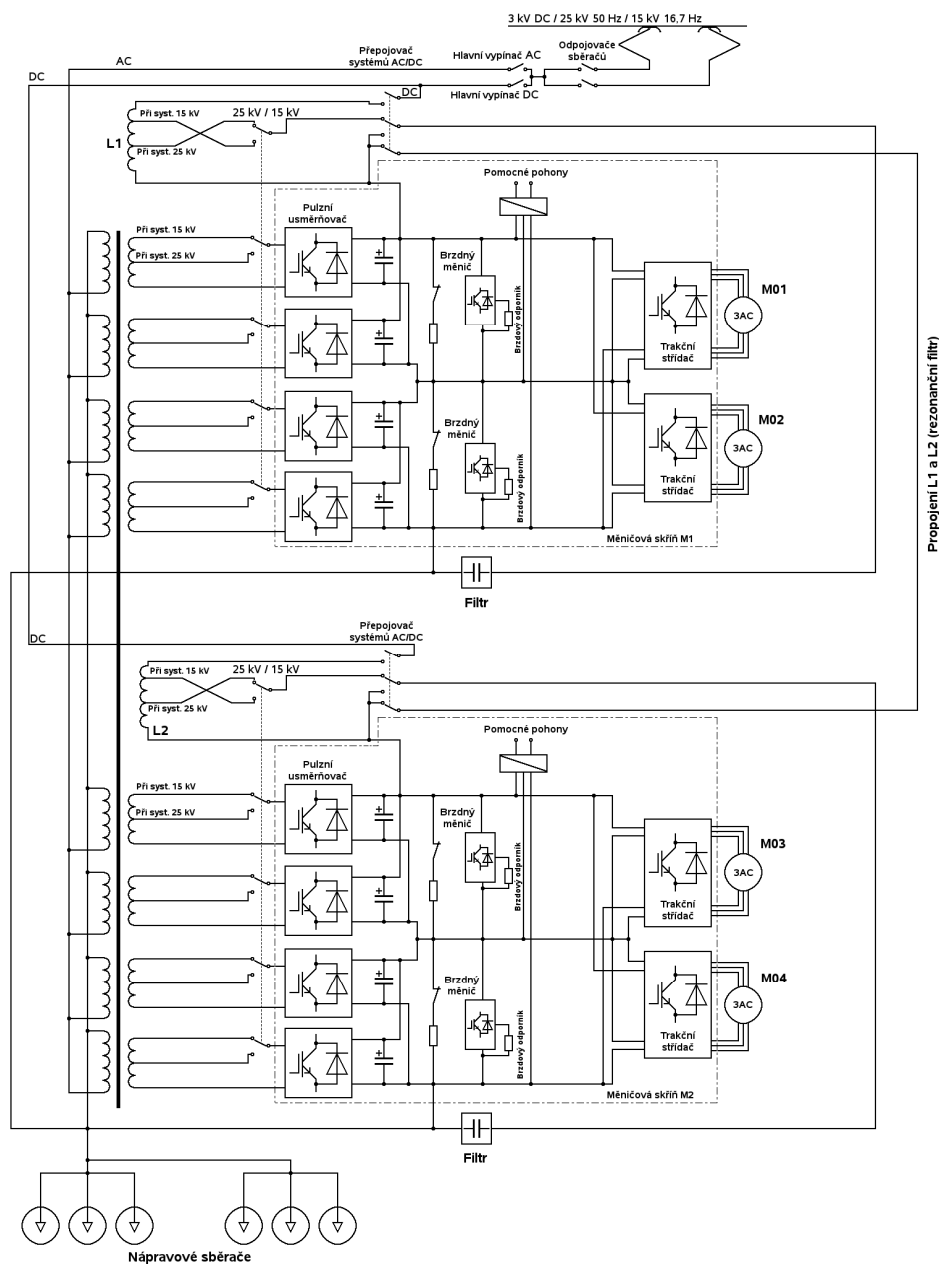
Při napájení hnacího vozidla ze střídavé napájecí proudové soustavy [6] (15 kV 16 2/3 Hz a 25 kV 50 Hz) je stejnosměrný meziobvod napájen z pulzního usměrňovače (zpravidla čtyřkvadrantového), který může při rekuperačním brzdění plnit i funkci střídače. V současné době je součástí hnacích vozidel stále i trakční transformátor, který zajišťuje transformaci vstupního napájecího napětí (v trakčním vedení) na hodnoty podstatně nižší s ohledem na technické parametry spínacích výkonových polovodičových prvků v měničích. Přejde-li asynchronní motor do generátorického režimu, je mu ze stejnosměrného meziobvodu přes spínací prvky střídače dodáván jalový výkon a současně je přes antiparalelně zapojené diody zpětně dodávána energie do meziobvodu (paralelně řazené diody plní funkci usměrňovače). Rekuperovaná energie vznikající při elektrodynamickém brzdění je buď spotřebovávána v brzděném rezistoru (jako u trakce stejnosměrné), anebo je přes vstupní čtyřkvadrantový usměrňovač (fungující v brzděném režimu jako střídač) vracena do trakčního vedení ke spotřebě jiným hnacím vozidlem.

Kromě klasického zapojení střídače se mohou uplatnit např. střídače víceúrovňové (zpravidla tříúrovňové) s použitím tzv. upínacích diod, popř. i zdvojené střídače napájející trakční asynchronní motory se dvěma vinutími spojenými do hvězdy (tento systém byl realizován u elektrických jednotek ČD řady 471).

Změna frekvence i efektivní hodnoty výstupního napětí se dnes realizuje nejčastěji pulzně-šířkovou modulací (PWM).

Pro dosažení řízení žádaného momentu asynchronního motoru a jeho otáček je regulace prováděna mikroprocesorovým regulátorem, přičemž se používají 2 základní metody řízení – **vektorové řízení a přímé řízení momentu** [9]. **Vektorová regulace** je metoda pro řízení pohonů, založená na vyhodnocení tokotvorné a momentotvorné složky statorového proudu a jejich oddělené regulaci. U **přímé metody regulace** je vyhodnocován

moment a magnetický tok, přičemž obě veličiny jsou udržovány na zadaných hodnotách, případně v určitém tolerančním pásmu.



Blokové schéma lokomotivy 109 E

Obr. 12 Zjednodušené schéma zapojení trakčních obvodů třísystemové lokomotivy 109 E s asynchronními motory

Na Obr. 12 je zobrazeno zjednodušené (blokové) schéma hlavních obvodů nejnovější třísystemové elektrické lokomotivy z produkce firmy Škoda Transportation, a. s. Plzeň, která je u ČD provozována pod řadovým označením 380 (tovární označení 109 E). [8]

S nástupem nové koncepce trakčních pohonů však vyvstal nový problém. Frekvenční měnič napájející asynchronní motor představuje nelineární prvek a tím i zdroj harmonických proudů, které se negativně projeví na chodu motoru (pulzační momenty, vyšší oteplení motoru, vyšší hluchost). Kromě toho zde vyvstává problém zpětného vlivu frekvenční

regulace na napájecí síť (elektromagnetická kompatibilita EMC). Z hlediska EMC je složitější situace na střídavé napájecí síti, kde se u pohonů používají čtyřkvadrantové měniče.

Kromě trakčního pohonu tvořeným asynchronními motory se v poslední době vývoj v elektrických pohonech začal věnovat i pohonům s jiným typem bezkomutátorového motoru – **pohony se synchronním motorem s permanentními magnety** [6]. Konstrukci těchto motorů umožnily nové technologie výroby permanentních magnetů – ze zvláštních zemin, zejména se jedná o slinutiny neodym – železo – bor nebo samarium – kobalt, u nichž se dosahuje vysoké hodnoty magnetického sycení (1 až 1,2 T). Oproti asynchronním motorům mají tyto motory některé přednosti – vyšší krouticí moment vztahovaný na hmotnost stroje, menší moment setrvačnosti, menší oteplení, vyšší momentovou přetížitelnost, mohou vyvíjet maximální moment v klidovém stavu. Konstrukce motorů umožňuje i řešení pohonu bez použití převodů. V současné době motory dosahují výkonů v řádu několika set kW a mohou najít uplatnění zejména v pohonech lehkých kolejových vozidel (např. tramvaje), kde se nabízí možnost přímého individuálního pohonu kol (a vozidlo v nízkopodlažním provedení).

Stejně jako v jiných oborech lidské činnosti, tak i v oblasti trakčních pohonů lze zaznamenat obrovský pokrok nejen z hlediska samotných konstrukčních celků (komponentů) tvořících vlastní trakční pohon (motory, transformátory, měniče), ale i z hlediska jejich ovládání a řízení (regulace), tj. např. spínací programy, algoritmy, software. Koncepce trakčního pohonu odráží v plné míře aktuální stav znalostí a dovedností vědy a techniky a zároveň umožňuje využít praktických zkušeností elektrických pohonů v provozních aplikacích pro jejich další vylepšování a inovace. Patrně největší změna v koncepci trakčních pohonů nastala s rozvojem polovodičové techniky, kdy komutátorové stroje byly nahrazeny stroji bezkomutátorovými (asynchronními i synchronními s permanentními magnety), a klasické mechanické spínače (stykače) a předřadné (rozjezdové) rezistory byly nahrazeny trakčními měniči sestavenými z polovodičových vypínatelných prvků.

V současné době tedy standardní koncepce trakčního pohonu zahrnuje [6]:

- použití asynchronního motoru s kotvou nakrátko,
- střídač s napěťovým vstupním obvodem,
- střídač osazený vypínatelnými polovodičovými prvky,
- výstupní napětí je formováno šířkově pulzní modulací (PWM),
- mikroprocesorový regulátor nejčastěji s vektorovým řízením točivého momentu.

V následující tabulce Tab. 1 (převzata z [4]) je na závěr této kapitoly uveden stručný přehled základních typů trakčních motorů a možnosti jejich regulace (řízení) v trakčních pohonech:

Způsob řízení	Stupňové	Plynulé	
		Stejnoseměrný s cizím buzením	Asynchronní
Trakční motor	Stejnoseměrný, sériový	Stejnoseměrný s cizím buzením	Asynchronní
Řízení napětí - stejnoseměrný systém	skupinové řazení, předřazené odpory	pulzní regulace	napěťový nebo proudový střídač
Řízení napětí - střídavý systém	odbočky na transformátoru, diodový usměrňovač	tyristorový řízený usměrňovač	pulzní usměrňovač, napěťový střídač
Řízení buzení - stejnoseměrný systém	šentovací odpory a tlumivka	pulzní měnič z pomocné sítě	poměrem napětí a kmitočtu
Řízení buzení - střídavý systém	šentovací odpory	reverzační usměrňovač ze samostatného vinutí transformátoru	poměrem napětí a kmitočtu
Elektrická brzda - stejnoseměrný systém	tramvajová ev. s přibuzováním	odporová s pulzním řízením odporu, rekuperace	rekuperace, odporová brzda v meziobvodu
Elektrická brzda - střídavý systém	cize buzená, do stálého odporu	odporová, (rekuperace)	rekuperace, odporová v meziobvodu
Řídicí obvody	stykače, kontroléry, relé	analogová regulace proudu a rychlosti	hierarchické procesorové systémy

Tab. 1 Typická provedení elektrické části elektrických hnacích vozidel

4 Princip přenosu momentu mezi kolem a kolejí

V předchozí kapitole byly zmíněny základní principy a možnosti regulace typických trakčních pohonů použitých u elektrických trakčních železničních vozidel napájených některým ze 3 nejrozšířenějších napájecích systémů. Trakční motory jako elektromechanické měniče přeměňující dodávanou elektrickou energii příslušných parametrů na energii mechanickou jsou tedy zdroji trakčního mechanického výkonu, který se dále přenáší mechanickou cestou na hnací dvojkolí a využitím tzv. adheze ve styku kol s kolejnicí se vytváří silové působení, které má za následek pohyb dvojkolí a tím i celého hnacího vozidla v předem zvoleném směru jízdy. Kromě zajištění pohybu samotného hnacího vozidla se předpokládá i zajištění pohybu celé vlakové soupravy, tj. všech kolejových vozidel, která jsou k danému hnacímu vozidlu přivěšena (popř. spojena automatickým spřáhlem) a vzájemně propojena elektrickým vedením (kabelem) a pneumatickým potrubím. V dalším textu bude zmínka o principu přenosu hnacího momentu mezi kolem a kolejnicí.

4.1 Adheze – základní vlastnost nutná pro pohyb kolejových vozidel

V úvodu této kapitoly je potřeba nejprve definovat vlastní pojem **adheze**. **Adhezi je možné definovat** např. dle [10] **jako schopnost přenášet stykovou ploškou mezi kolem železničního vozidla a kolejnicí tečné síly**. Vznik tečné síly ve styku kola s kolejnicí má pro kolejovou dopravu zásadní význam, protože na její velikosti závisí jednak tažná síla hnacího vozidla při rozjezdu a při vlastní jízdě vozidla (vlaku), a jednak i brzdná síla při úmyslném zpomalování či zastavování vozidla (vlaku). Železnice, na kterých je využívána pro pohyb kolejových vozidel adheze, se označují jako adhezní, přičemž je prokázána praktická použitelnost adhezní železnice pro sklony (stoupání) až do výše 40 ‰. Při vyšších sklonech se zpravidla pro pohyb vozidel využívá ozubnice, tj. přídatné kolejnicové pásy tvořené zuby (ozubené hřebeny), umístěné obvykle uprostřed (v ose) koleje, do kterých zabírá ozubené kolo poháněné vlastním trakčním pohonem hnacího vozidla.

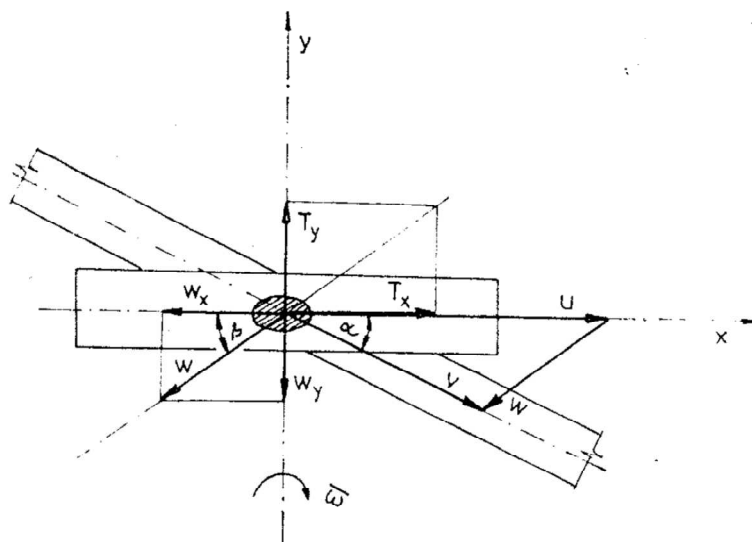
Styk železničního kola s kolejnicí je možné zjednodušeně pokládat za styk dvou válcových ploch [2], [10], přičemž jednu válcovou plochu představuje povrch hlavy kolejnice o poloměru 300 mm a druhou válcovou plochu představuje povrch jízdní plochy kola, která je idealizovaná (ve skutečnosti se jedná o kuželovou plochu), a tvoří ji jízdní profil kola o poloměru v rozmezí od 450 mm (u vozů) do 625 mm (u hnacích vozidel). Obě tělesa (tj. kolo a kolejnice) nahrazená válcovými plochami jsou reálně z pružných materiálů schopných deformací vlivem sil působících mezi nimi, což má za následek, že styk obou těles

nepředstavuje bod, ale plošku [10], [11]. Vzniklá dotyková ploška při působení svislé normálové (kolové) síly má vzhledem k rozdílným poloměrům obou mimoběžných válců tvar elipsy protažené ve směru osy kolejnice. Praktické výzkumy však ukazují, že skutečný tvar dotykové plošky se může od tvaru elipsy podstatně lišit. Velikost dotykové plošky [2] je závislá na velikosti normálové (kolové) síly působící v kontaktní ploše, na geometrických parametrech (poloměrech křivosti) povrchů kola a kolejnice a na materiálových vlastnostech kola a kolejnice (modul pružnosti v tahu a ve smyku). Velikost plošky může být v rozmezí cca $1 - 1,5 \text{ cm}^2$, při dostatečném přitlaku lze na ní realizovat tečné síly o velikosti až 40 kN. [12]

Pro lepší názornost je zapotřebí popsat základní možnosti vzájemného vztahu kola a kolejnice (vznik tečné síly T při existenci svislé normálové (kolové) síly N) [11], [13]:

- při valení kola se nevyvozuje tečná síla (případ čistého valení),
- kolo vyvozuje třecí tečnou sílu T ($T = N \cdot \varphi$, kde φ je součinitel tření) a přitom:
- kolo se neotáčí (otáčení kola je zamezené) a posouvá se určitou posuvnou rychlostí v ve směru jízdy,
- kolo se otáčí, ale neposouvá se (posuv kola ve směru jízdy je zamezen),
- kolo se otáčí vyšší úhlovou rychlostí (trakce) nebo nižší úhlovou rychlostí (brzdění), než odpovídá posuvné rychlosti v jízdy vozidla; v tomto případě kolo vyvozuje adhezní tečnou sílu T ($T = N \cdot \mu$, kde μ je součinitel adheze).

Největší tečnou sílu lze získat v případě, že máme kolo se zamezeným otáčením, které se pohybuje malou posuvnou rychlostí. Při protáčejším se kole a se vzrůstajícím relativním skluzem přechází adhezní mechanismus v tření. Z hlediska silového působení má největší význam podélný směr, ve kterém se uskutečňují základní tečné síly, tj. síly tažné a brzděné.



Obr. 13 Kolo valící se v rovině odchýlené od roviny kolejje o úhel náběhu α

Na Obr. 13 [14] je znázorněno schematicky silové působení kola a kolejnice v obecném případě, kdy se válcové železniční kolo valí odchýlené oproti svislé rovině kolejnice o úhel

náběhu α ve směru znázorněném vektorem posuvné rychlosti v . Pokud působí na kolo svíslá normálová (kolová) síla N a hnací moment M_h a mezi povrchy existuje součinitel adheze μ , potom skluzové rychlosti w_x a w_y [10] vyvolávají tečné síly T_x a T_y (označení vyplývající na základě zvoleného souřadného systému x, y, z svázaného s kolem), přičemž tečná síla T_x představuje tažnou (resp. brzdou) sílu a tečná síla T_y má významný vliv na stabilitu pohybu dvojkolí (vozidla). Výsledná tečná síla T vznikající ve styku kola s kolejnicí je přímo úměrná velikosti svíslé kolové síly N , přičemž součinitelem úměrnosti je právě tzv. **součinitel adheze μ** , který v reálném prostředí obvykle nabývá hodnot od 0,15 do 0,4. Protože se tečná síla T rozlišuje ve složkách ve směru os x a y , můžeme i součinitel adheze rozlišovat v obou osách, tj. máme součinitele adheze μ_x a μ_y . Podélná i příčná tečná síla jsou v dotykové plošce kontaktu kola s kolejnicí přenášeny adhezním způsobem za přítomnosti vzniku skluzových rychlostí. Na Obr. 13 jsou dále znázorněny vektory základních rychlostí - obvodová rychlost u dotykové plošky po obvodu kola ($u = r \cdot \omega$, kde r je poloměr kola a ω je jeho úhlová rychlost) a rychlost v , což je posuvná rychlost dotykové plošky po kolejnici a zároveň je to rychlost středu kola (vozidla) v požadovaném směru jízdy. Mezi povrchy kola a kolejnice však existuje skluzová rychlost w (**při přenosu tažné síly dochází vždy k určitému měřitelnému rozdílu mezi obvodovou rychlostí u kola a skutečnou posuvnou rychlostí v vozidla**), která je tvořena svými složkami – podélnou w_x (ve směru osy x) a příčnou w_y (ve směru osy y). Se skluzovými rychlostmi potom úzce souvisí i tzv. relativní skluz s , vyjádřený opět ve složkách jako s_x a s_y , pro které platí [10]:

$$S_x = \frac{w_x}{v} \quad ; \quad S_y = \frac{w_y}{v} \quad [-; \text{m}\cdot\text{s}^{-1}, \text{m}\cdot\text{s}^{-1}] \quad (1); (2)$$

Celkový skluz s je možné vyjádřit vztahem:

$$s = \sqrt{s_x^2 + s_y^2} \quad [-; -, -] \quad (3)$$

Při obecném pohybu kola (dvojkolí) po kolejnici dochází k podélnému valení kol po kolejnici, k příčnému pohybu kol (dvojkolí) a případně i k natáčení dvojkolí kolem svíslé osy (k tzv. spinu). Při pohybu dvojkolí v okolí centrované polohy ve volném kanálu koleje se velikost spinu blíží k nule a pro zjednodušení se často jeho vliv zanedbává. Vliv spinu se uplatní jen u kol s vyšší hodnotou efektivní kuželovitosti jízdní plochy a při malých hodnotách podélného či příčného skluzu ($s < 0,1 \%$), skluzová spinová rychlost dosahuje největší hodnoty na obvodu plošky v místě delší poloosy. [10], [11]

V obecném případě, kdy ještě není přenášena maximální tečná síla, předpokládáme v dotykové plošce existenci dvou oblastí – **oblast lpění** a **oblast skluzu** [10], [15]. Oblast lpění se nachází na náběžné straně plošky ve směru pohybu kola (vozidla) a oblast skluzu je na opačné straně. V oblasti lpění je kolo vystaveno povrchové deformaci, přičemž

deformované povrchy kola i kolejnice se po sobě odvalují bez vzájemného posuvu. V oblasti skluzu již dochází k vzájemnému přemísťování povrchů. Výsledná tečná síla T je v tomto případě součtem tečných sil v oblasti lpění a skluzu. Maximální tečnou sílu dotyková ploška přenáší tehdy, když se oblast skluzu rozšíří na celou dotykovou plošku – velikost tečné síly přenášené dotykovou ploškou je závislá na velikosti oblasti skluzu (tj. na velikosti skluzu). Povrchová vlákna kola jsou před stykem kola s kolejnicí natlačena a za stykem naopak natažena, přičemž u kolejnice je tomu přesně naopak. Z toho vyplývá, že v oblasti lpění se po sobě odvalují povrchové vrstvy „natlačeného“ kola a „natažené“ kolejnice, což má za následek diference projevující se ve skluzové rychlosti či relativním skluzu.

Základní charakteristikou mechanismu adheze (fyzikálního procesu přenosu tečných sil mezi kolem a kolejnicí) je tzv. **skluzová charakteristika** [10], [14] (tj. závislost $\mu = f(s)$), nebo **rychlostní skluzová charakteristika** (tj. závislost $\mu = f(w)$ – viz Obr. 14 [10], [14]). Kromě toho se obvykle zejména v trakčních výpočtech využívá tzv. **adhezni charakteristika** [10], [14] (Obr. 15), což je závislost $\mu = f(V)$, přičemž s rostoucí rychlostí jízdy součinitel adheze μ poněkud klesá. Závislost $\mu = f(V)$ považovaná z hlediska železničního provozu za statisticky významnou je dána empirickými vztahy odvozenými z provedených měření a platnými pro suchou kolej, mezi něž se řadí zejména vztah podle Curtiuse a Knifflera [10], [13], [16]

$$\mu_{C+K} = \frac{7,5}{V+44} + 0,161 \quad [-; \text{km}\cdot\text{h}^{-1}] \quad (4)$$

anebo podle Kothera [10], [13], [16]

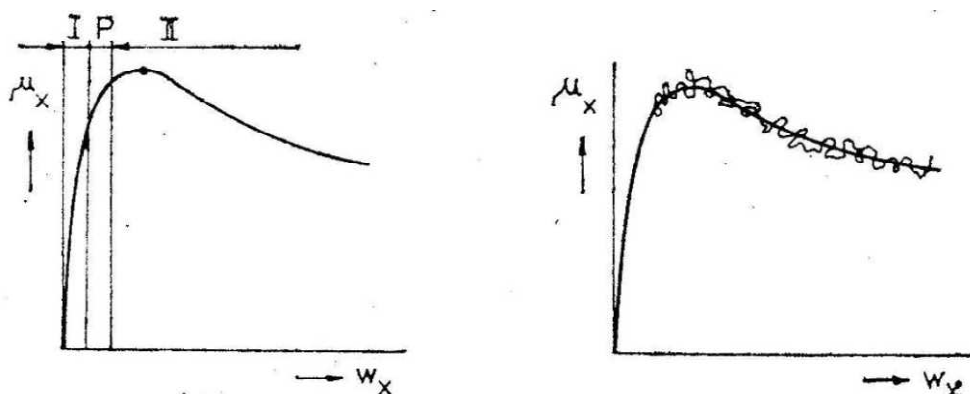
$$\mu_K = \frac{9,0}{V+42} + 0,116 \quad [-; \text{km}\cdot\text{h}^{-1}] \quad (5)$$

Na základě prováděných měření na VŠDS Žilina byla prof. Čápem [17] navržena úprava stávajícího vztahu Curtiuse a Knifflera (4) na vztah více se přibližující reálným podmínkám

$$\mu_{C+K} = \frac{7,5}{V+44} + 0,23 \quad [-; \text{km}\cdot\text{h}^{-1}] \quad (6)$$

Na úplné skluzové charakteristice (Obr. 14) se dají identifikovat celkem 3 pásma [12] – pásmo pevné vazby (I), pásmo přechodové (P) a pásmo volné vazby (II), přičemž pásmo volné vazby začíná ještě před vrcholem křivky. Průběh charakteristiky poskytuje též fyzikální představu, že styková ploška se chová v pásmu pevné vazby (ve vzestupné části) jako normální viskózní tlumič s vysokou hodnotou tlumicí konstanty (pevná vazba kola s kolejnicí) a naopak v pásmu volné vazby je charakter tlumení negativní, tj. s rostoucí hodnotou skluzové rychlosti w klesá tlumicí síla (relativně volné spojení kola s kolejnicí). [18] **V železničním provozu je snaha, aby se přenos tečných sil ve styku kola a kolejnice uskutečňoval výhradně ve vzestupné (pracovní či efektivní) části (pásmu I) skluzové charakteristiky, ve které se uplatňuje lpění a efektivní skluz.** Za vrcholem adhezni

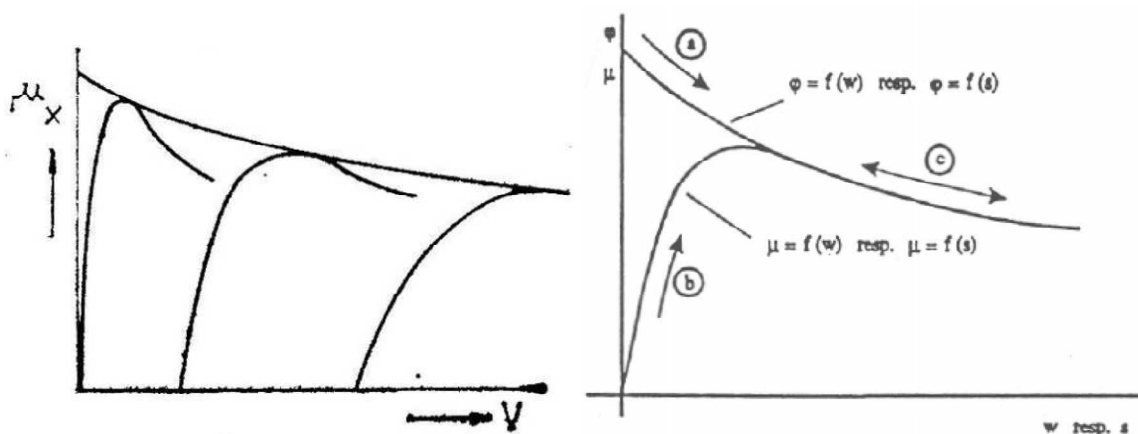
charakteristiky se křivka součinitele adheze napojuje na třecí charakteristiku představující průběh součinitele smykového tření f , což je oblast již neefektivní a dochází v ní k úplnému prokluzu. V přechodovém pásmu ztrácí celý systém stabilitu a mění se jeho vlastní frekvence.



Obr. 14 Rychlostní skluzová charakteristika (idealizovaná a skutečně naměřená)

Z [19] vyplývá, že limitní strmota vzestupné větve adhezní (skluzové) charakteristiky závisí na rozměrech dotykové plošky a konstantě pružnosti povrchů a nezávisí na součiniteli tření mezi kolem a kolejnicí.

Kolo hnacího vozidla se pohybuje reálně po vertikálně nerovné kolejnici, což má za následek vznik dynamických změn kolových sil, které se zvyšují s rostoucí rychlostí jízdy vozidla. Vlivem změn kolových sil následně dochází k deformaci skluzových charakteristik, přičemž na adhezní křivku lze nahlížet jako na obálku množiny vrcholů rychlostních skluzových charakteristik za postupně se zhoršujících podmínek ve styku kola s kolejnicí [12] (Obr. 15). Mimo dynamické vlivy je tvar adhezních charakteristik ovlivněn i příčinnou souvislostí vztahu adheze a tření, kdy sestupná větev skluzové charakteristiky v podstatě představuje třecí charakteristiku.

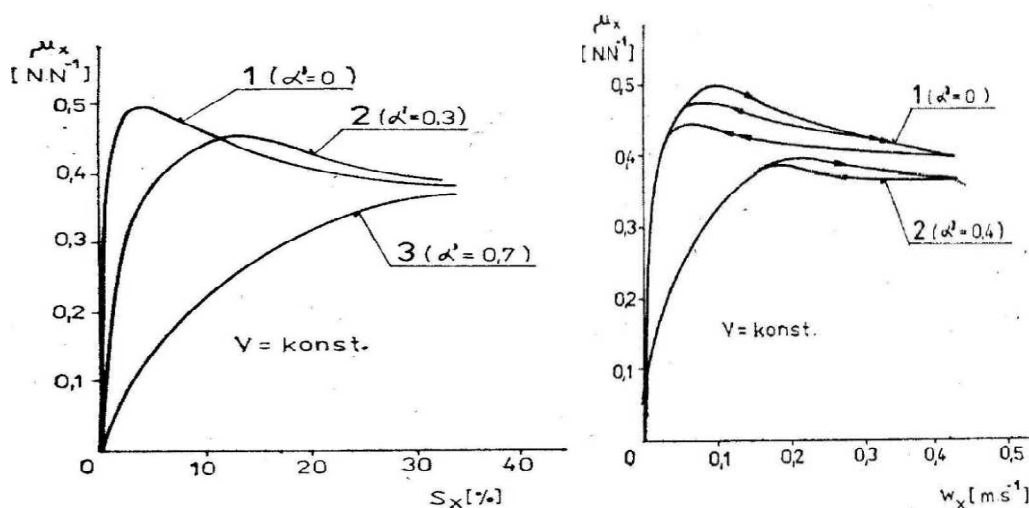


Obr. 15 Adhezní charakteristika a třecí charakteristika

Experimentální činností na VŠDS v Žilině byla prokázána tendence deformací skluzových charakteristik. Na Obr. 16 [12] (obr. v levé části) představuje křivka 1 skluzovou

charakteristiku pro konstantní velikost kolové síly ($N = konst.$), zatímco křivky 2 a 3 zobrazují skluzové charakteristiky při proměnné kolové síle vyjádřené hodnotou koeficientu α . Zhoršováním dynamických podmínek (zvyšováním hodnoty součinitele α) ve styku kola s kolejnicí dochází k poklesu hodnoty dosažitelného součinitele adheze μ_{max} při současném zvyšování hodnoty skluzové rychlosti odpovídající μ_{max} . K podobné deformaci skluzové charakteristiky dochází i vlivem přítomnosti vlhkosti či nečistot na koleji. Obecně lze říci, že v reálném provozu je proces adheze významně ovlivněn též faktory působícími v dotykové ploše kolo – kolejnice, mezi něž patří zejména přítomnost cizích látek (vlhkost (voda), olej, listí, rez, prach, písek atd.), teplo vznikající při skluzu, drsnost dotykových ploch, tvar dotykových ploch a existence příčných skluzů. [20]

Zajímavým jevem je tzv. vratnost skluzových charakteristik (Obr. 16 – obr. v pravé části). Při návratu z velkého prokluzu je průběh součinitele adheze μ zpravidla mírně odlišný (podle zpětné větve) než v případě rozvíjejícího se skluzu. Na obrázku jsou zobrazeny skluzové charakteristiky při proměnné kolové síle vyjádřené hodnotou koeficientu α . Křivka 1 platí pro ideální podmínky ($\alpha = 0$), křivka 2 platí pro zhoršené dynamické podmínky ($\alpha = 0,4$). [12]



Obr. 16 Tendence deformací a vratnost skluzové charakteristiky

Je nutné ještě zmínit, že většina teoretických výpočtů a experimentálních měření se soustřeďovala především na zkoumání adheze v podélném směru. Nicméně se již delší dobu objevují názory, že adheze v příčném směru vykazuje velmi podobné vlastnosti a charakteristiky jako adheze ve směru podélném. Existují specifické vlastnosti (např. drsnost povrchů, odlišná plastizace atd.) kola a kolejnice v podélném i příčném směru, které mohou průběh adhezních skluzových charakteristik ovlivnit, nicméně zásadní vlastnosti se nemění.

Problém adheze se však netýká pouze tažných sil, nýbrž i sil brzdných s tím rozdílem, že se síly a skluzové rychlosti při brzdění vyjadřují v záporných hodnotách, přičemž adhezní charakteristika má obdobný průběh. Z toho důvodu protiskluzové ochrany při jízdě tahem

regulují tažnou sílu a při brzdění naopak regulují brzdnou sílu, aby nedošlo k zablokování kol a hnací vozidlo se nepohybovalo smykem.

Adhezní vlastnosti hnacího vozidla jsou ovlivňovány konstrukčním provedením hnacího vozidla (zejména jeho pojezdu), přičemž významnými faktory jsou [20]:

- způsob uspořádání pohonu hnacích dvojkolí,
- změny zatížení náprav při jízdě hnacího vozidla (souvisí se způsobem přenosu tažných sil – vznik klopných momentů),
- dynamické změny zatížení náprav vlivem účinků vypružení hnacího vozidla.

4.2 Pohon hnacích dvojkolí – základní způsoby provedení

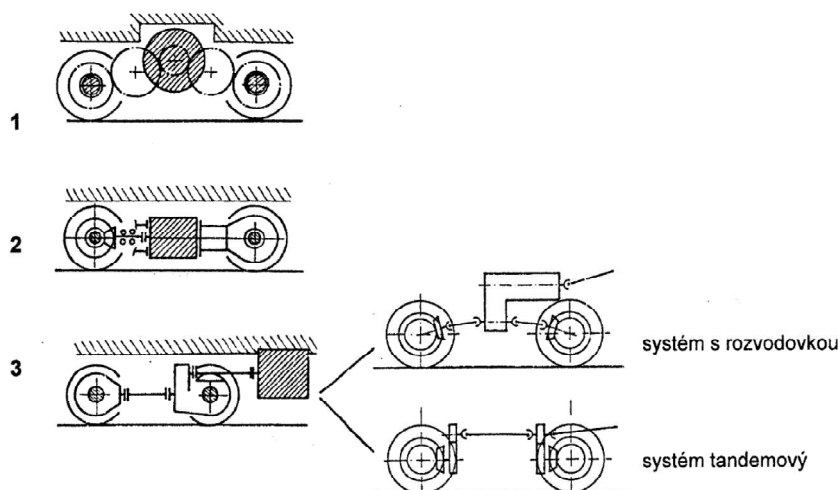
Zdrojem mechanického (kroticího) momentu u elektrických hnacích vozidel a u motorových hnacích vozidel s elektrickým přenosem výkonu je elektrický trakční motor (elektromechanický měnič), u motorových hnacích vozidel s mechanickým a hydraulickým přenosem výkonu je to přímo spalovací motor. Aby hnací vozidlo bylo schopno vyvíjet tažnou sílu a tím uvádět do pohybu sebe i další vozidla přivěšená k hnacímu vozidlu, je nutné nejprve zajistit přenos kroticího (mechanického) momentu z trakčního motoru na hnací dvojkolí. Přenos kroticího momentu se realizuje zpravidla mechanickou cestou, přičemž existuje několik možností. V konstrukci pohonu hnacích dvojkolí (náprav) u hnacích vozidel se uplatňují 3 základní varianty – pohon hnacích dvojkolí ústřední, skupinový a individuální.

Ústřední pohon dvojkolí [21], [22] je nejméně častý, který se v dnešní době využívá u motorových hnacích vozidel (nezávislé trakce) s hydraulickým přenosem výkonu. Princip pohonu spočívá v tom, že se kroticí moment ze spalovacího motoru přenáší pomocí kloubových hřídelů přes hlavní převodovku tvořenou převážně hydraulickými prvky (měniči a spojkami) na nápravové převodovky, které zajišťují přenos momentu přímo na hnací dvojkolí. Hnací moment je z hlavní převodovky přenášen současně na všechny hnací dvojkolí lokomotivy – všechna hnací dvojkolí jsou mechanicky vázána a jsou poháněna jedním společným strojem (zdrojem kroticího momentu), tj. spalovacím motorem.

Skupinový pohon dvojkolí [21], [22] se v současné době používá u podvozkových hnacích vozidel elektrické a motorové trakce menšího výkonu (Obr. 17). Princip skupinového pohonu je takový, že hnací dvojkolí téhož podvozku jsou poháněna společným zdrojem kroticího momentu pro daný podvozek hnacího vozidla. Hnací dvojkolí příslušného podvozku jsou vždy mechanicky vázána a poháněna jedním společným strojem (zdrojem kroticího momentu). Zdrojem momentu u motorových lokomotiv s hydraulickým přenosem výkonu je spalovací motor, od něhož se kroticí moment pomocí kloubových hřídelů přenáší přes hlavní převodovku tvořenou hydraulickými prvky (měniči a spojkami) a přes nápravové převodovky na hnací dvojkolí příslušného podvozku. Naproti tomu zdrojem momentu u

elektrických lokomotiv a motorových lokomotiv s elektrickým přenosem výkonu je elektrický trakční motor, od něhož se krouticí moment opět pomocí kloubových hřídelů přenáší přes nápravové převodovky na hnací dvojkolí příslušného podvozku. Podle směru uložení trakčního motoru a způsobu přenosu momentu na hnací dvojkolí rozlišujeme tyto základní typy skupinového pohonu [21], [22]:

- trakční motor s příčnou osou rotace vůči podélné ose vozidla s vazbou na hnací dvojkolí pomocí ozubených kol,
- trakční motor s podélnou osou rotace vůči podélné ose vozidla umístěný mezi hnacími dvojkolími příslušného podvozku,
- trakční motor s podélnou osou rotace vůči podélné ose vozidla umístěný vně hnací dvojkolí příslušného podvozku (zpravidla uložený na skříni vozidla).



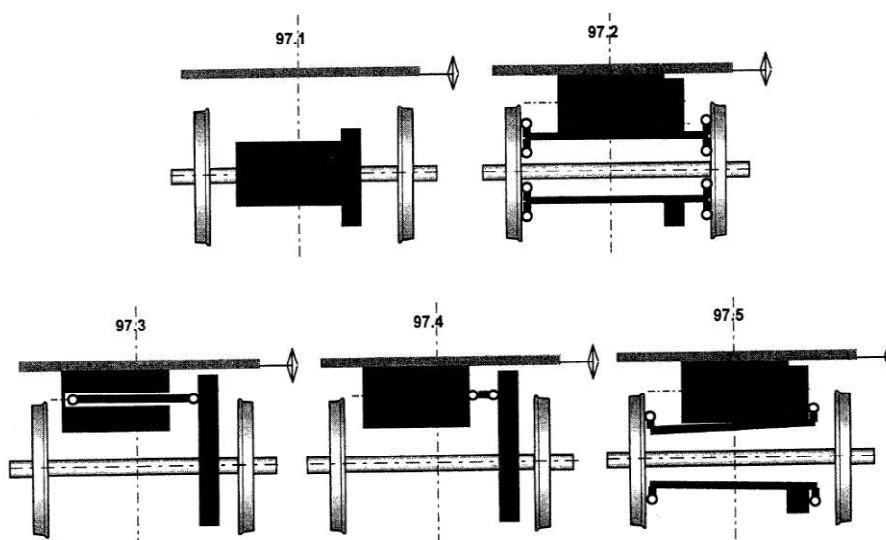
Obr. 17 Základní typy skupinového pohonu dvojkolí
(1 – motor s příčnou osou rotace, vazba ozubenými koly; 2 – motor s podélnou osou rotace, mezi nápravami; 3 – motor s podélnou osou rotace, mimo nápravy)

U hnacích vozidel, u kterých je zdrojem krouticího momentu spalovací motor, se obvykle používá třetí varianta, tj. s podélnou osou rotace vůči podélné ose vozidla umístěný vně hnacích dvojkolí – s upevněním na rámu podvozku nebo s upevněním na skříni hnacího vozidla (zpravidla včetně hlavní (hydrodynamické) převodovky, se kterou může tvořit kompaktní celek).

Individuální pohon dvojkolí [21], [22] (Obr. 18) je u hnacích vozidel v současné době nejrozšířenější a používá se především u hnacích vozidel elektrické trakce a u vozidel motorové trakce s elektrickým přenosem výkonu, u kterých je zdrojem krouticího momentu elektrický trakční motor pohánějící příslušné jedno hnací dvojkolí. Kromě toho se může jednat o individuální pohon vždy, když je hnací dvojkolí poháněno samostatným zdrojem krouticího momentu (spalovacím motorem) bez ohledu na typ přenosu výkonu. Zpravidla o individuálním pohonu hnacích dvojkolí můžeme tedy hovořit i v těch případech, jedná-li se o dvounápravové hnací vozidlo s mechanickým (hydraulickým) přenosem výkonu a pouze

jedno z obou dvojkolí je poháněno a přitom obě dvojkolí nejsou spolu mechanicky (např. kloubovým hřídelem) ani jinak propojena. Nicméně v dalším textu bude věnována pozornost tradičnímu pojetí individuálního pohonu hnacích dvojkolí, tj. s použitím trakčního motoru. Důležitým aspektem individuálního pohonu hnacích dvojkolí je způsob uložení trakčního motoru a přenosu krouticího momentu z motoru na hnací dvojkolí. Existují 3 základní možnosti provedení [21], [22]:

- trakční motor spočívá celou svou hmotností na hnací nápravě, tj. hmotnost trakčního motoru není vůbec odpružená,
- trakční motor spočívá částí své celkové hmotnosti na hnací nápravě prostřednictvím tlapových ložisek a zbývající část je pružně zavěšena v rámu podvozku (tzv. tlapový trakční motor), popř. skříně hnacího vozidla, tj. tato zbývající část trakčního motoru je odpružená,
- trakční motor je celou svou hmotností zavěšený v rámu podvozku, popř. skříně hnacího vozidla, tj. celá hmotnost trakčního motoru je odpružená.



Obr. 18 Základní typy individuálního pohonu dvojkolí

(97.1 – pohon tlapovým motorem; 97.2 – pohon dutým hřídelem objímajícím nápravu; 97.3 – pohon kloubovým hřídelem uloženým v dutině rotoru trakčního motoru; 97.4 - pohon kloubovým hřídelem uloženým vně rotoru trakčního motoru; 97.5 - pohon kloubovým dutým hřídelem objímajícím nápravu)

V návaznosti na výše zmíněné možnosti uložení trakčního motoru je možné provést další rozdělení možností realizace individuálního pohonu hnacích dvojkolí s ohledem na konstrukci [21], [22]:

- pohon tlapovým trakčním motorem – s kluznými ložisky,
- s valivými ložisky,
- s tangenciálně vypruženým velkým ozubeným kolem,
- s odpruženým dutým hřídelem,

- pohon dutým hřídelem objímajícím nápravu – s pružinovým mechanismem,
 - s ojníčkovým mechanismem,
- pohon kloubovým hřídelem – uloženým v dutině rotoru trakčního motoru,
 - objímajícím hnací nápravu,
 - uloženým vně rotoru trakčního motoru,
 - s podélnou osou rotace vůči podélné ose vozidla.

V této kapitole je uveden pouze základní přehled možných konstrukcí provedení pohonu hnacích dvojkolí u hnacích vozidel. Detailnější popisy jednotlivých konstrukčních řešení však nejsou předmětem této diplomové práce a proto zde nejsou podrobněji analyzovány.

4.3 Přenos krouticího momentu z hnacích kol na kolej

Přenos krouticího momentu z hnacích kol na kolej (železniční dopravní cestu) je ovlivněn mnoha aspekty, mezi něž lze zařadit především adhezi a též způsob pohonu hnacích dvojkolí. Kromě těchto dvou základních vlivů existuje celá řada dalších okolností, které mohou ovlivňovat kvalitu přenosu krouticího momentu z kol na kolej.

Mezi hnacím dvojkolím a kolejí dochází k silovému působení, které lze rozložit do tří vzájemně kolmých směrů [15]:

- směr podélný, rovnoběžný s osou koleje,
- směr kolmý na rovinu koleje,
- směr příčný, kolmý na oba předchozí směry.

V podélném směru vznikají u kolejových vozidel s adhezním pohonem tažné síly na obvodu hnacích kol a jim odpovídající reakce kolejnič. U hnacích vozidel zavádíme pojem tažná síla na obvodu hnacího dvojkolí, která je součtem tažných sil na obvodu kol téhož dvojkolí. Potom tažná síla na obvodu dvojkolí na mezi adheze je největší tažná síla dvojkolí, při které ještě nedojde k prokluzu dvojkolí. Kolová síla je silové působení kola na kolejnici v kolmém směru na rovinu koleje. Její velikost má přímý vliv na velikost tažné síly na obvodu kola na mezi adheze. Součet kolových sil působících na kola téhož dvojkolí potom udává nápravovou sílu. Část nápravové síly, která je vyvolána působením tíhy, se nazývá nápravovým zatížením, které je jedním z charakteristických parametrů kolejového vozidla. Maximální hodnota nápravového zatížení je pro každou trať určena únosností železničního svršku a mostů. Rozdíl mezi nápravovým zatížením a nápravovou silou představuje změnu nápravové síly. [15]

U současných elektrických a motorových lokomotiv jsou zpravidla všechna dvojkolí hnací, aby se při dané hmotnosti hnacího vozidla dosáhlo co největší tažné síly hnacího

vozidla na mezi adheze (celá tíha hnacího vozidla tedy představuje tzv. **adhezní tíhu hnacího vozidla G_a**).

Mezi tažnou silou dvojkolí na mezi adheze $F_{amax i}$ a nápravovou silou A_i platí vztah [15]:

$$F_{amax i} = \mu \cdot A_i \quad [N ; -, N] \quad (7)$$

kde $F_{amax i}$ - tažná síla na obvodu i-tého dvojkolí na mezi adheze,

μ - součinitel adheze,

A_i - nápravová síla i-tého dvojkolí

Vnější síly, které působí v podélném směru na hnací vozidlo, lze rozdělit podle příčiny jejich vzniku na [15]:

- reakce koleje na tažné síly dvojkolí hnacího vozidla,
- síly vyvolané působením sousedních vozidel na tahadlové nebo narážecí ústrojí hnacího vozidla,
- síly vyvolané setrvačností jednotlivých částí hnacího vozidla,
- síly vyvolané působením jízdních odporů na hnací vozidlo.

Výše uvedené síly působí v různé výšce nad temenem koleje, proto jejich moment k libovolnému bodu bude vždy nenulový. Má-li nastat při působení těchto sil rovnováha momentů, musí být nápravové síly odlišné od nápravového zatížení.

Na hnací dvojkolí působí krouticí moment vytvořený trakčním (spalovacím) motorem, který se na hnacím dvojkolí projevuje působením obvodové síly F_k . Krouticí moment lze vyjádřit jako součin obvodové síly F_k a poloměru kol dvojkolí r . [23] Hnací dvojkolí přenáší příslušnou část tíhy hnacího vozidla G a v místě dotyku kol s kolejí působí koleje na dvojkolí stejně velkou silou opačného smyslu. Působením obou sil vzniká v místě dotyku dvojkolí s kolejí tření, v jehož důsledku vzniká v místě dotyku hnacího dvojkolí s kolejí tečná (adhezní) síla T . Jedná se o vnější sílu, kterou působí kolejnice na kola dvojkolí. Zmíněné tření je tření adhezní, tj. adheze. Maximální velikost tečné síly T_{max} (na mezi skluzu) je dána součinem součinitele adheze μ a tíhy G , kterou dané dvojkolí přenáší. Hnací vozidlo se tedy uvede do pohybu až vznikem této síly, která působí z koleje na hnací dvojkolí ve směru pohybu hnacího vozidla. Vznik tečné síly T má dva důsledky [23]:

- moment vytvářený tečnou silou působí proti momentu vytvářenému obvodovou silou, což se nepříznivě projeví na velikosti úhlového zrychlení hnacího dvojkolí,
- tečná síla T uvede hnací dvojkolí a tím i celé hnací vozidlo do posuvného pohybu posuvným zrychlením a.

Tažná síla na obvodu hnacích dvojkolí F_{ok} je dána součtem všech obvodových sil F_k vznikajících na jednotlivých hnacích dvojkolích hnacího vozidla, působí ve styčných bodech jednotlivých hnacích dvojkolí s kolejí a má směr shodný se směrem jízdy (pohybu) celého

hnacího vozidla. Maximální možná tažná síla na obvodu hnacích dvojkolí, při jejímž působení se hnací dvojkolí ještě odvaluje a při jejím překročení již dochází ke skluzu, se označuje jako tažná síla na mezi adheze F_{adh} , přičemž je dána součinem maximální dosažitelné hodnoty součinitele adheze μ_{max} (tzv. mezí adheze) a tzv. adhezní tíhy G_a , jejíž velikost je u současných hnacích vozidel elektrické a motorové trakce shodná (totožná) s tíhou hnacího vozidla G , tj. $G = G_a$. [23] Velikost tažné síly na obvodu hnacích kol F_{ok} musí být menší (nebo může být maximálně rovna) než adhezní tažná síla F_{adh} , tj. musí platit nerovnost:

$$F_{ok} = \mu \cdot G \leq F_{adh} = \mu_{max} \cdot G_a \quad (8)$$

Tažná síla hnacího vozidla je ovlivněna několika faktory, které můžeme rozdělit do dvou základních skupin – statické a dynamické.

Statické faktory [24] jsou určeny výhradně vlastnostmi hnacího vozidla a nezávisí na tom, zda hnací dvojkolí prokluzuje či nikoliv. Jedná se především o změny nápravových sil způsobené klopnými momenty vznikajícími v důsledku působící tažné síly na háku (při dopravě přivěšené vlakové soupravy či jiného nečinného hnacího vozidla). Velikost změn nápravových sil je závislá na velikosti této tažné síly a na uspořádání pojezdu hnacího vozidla. Vzniklé změny nápravových sil nejsou u všech hnacích dvojkolí stejné (co do velikosti i směru působení), obvykle dochází k odlehčování prvních dvojkolí (ve směru jízdy hnacího vozidla) v obou podvozcích, přičemž nejvíce z obou podvozků je odlehčováno první dvojkolí prvního podvozku (ve směru jízdy hnacího vozidla). Naopak nejvíce přitěžováno je druhé (poslední) dvojkolí druhého podvozku (ve směru jízdy hnacího vozidla). Změny nápravových sil lze částečně eliminovat vhodnou konstrukcí nebo použitím přítlačných válců vyvozujících silové působení mezi rámem hnacího vozidla a rámem (čelníkem) podvozku. Válce zpravidla vyvozují konstantní silové působení (k úplné eliminaci změn nápravových sil dochází pouze při určité konkrétní hodnotě tažné síly), přičemž jsou ovládány v závislosti na směru jízdy hnacího vozidla. Protože vznikající celkový klopný moment působící rozdíly v silovém působení mezi podvozky nelze eliminovat mechanickým způsobem, provádí se obvykle přizpůsobení momentů trakčních motorů pomocí tzv. rozvážení proudů tekoucích do trakčních motorů. Velikost rozvážení (jeho hodnota bývá cca 1,1) je dána poměrem mezi proudy protékajícími trakčními motory jednotlivých podvozků, přičemž je nutné při jeho stanovení zohlednit nestejně oteplení trakčních motorů a maximální nápravová síla nejvíce přitíženého dvojkolí nesmí překročit dovolené zatížení nápravy (dvojkolí).

Dynamické faktory [24] jsou spojeny především s mechanickými vlastnostmi trakčního pohonu, tj. závisí na jeho konstrukčním uspořádání. Pro přenos krouticího momentu od trakčního motoru na hnací dvojkolí se zpravidla používají torzně pružné elementy (kloubové hřídele, pružné spojky, pryžové elementy atd.), čímž vzniká kmitavá soustava tvořená momenty setrvačnosti rotoru, dvojkolí a dalšími s nimi spojenými rotujícími částmi pohonu a

uvedenými pružnými elementy. Vznikající torzní kmity mohou způsobovat zvýšené mechanické namáhání elementů přenášejících krouticí moment a v konečném důsledku mohou mít za následek zvýšené opotřebenění hnacích kol a kolejnic. Poměry v rámci přenosu krouticího momentu jsou však závislé i na typu (druhu) trakčního motoru, způsobu jeho napájení a regulace. Kromě již zmíněných mechanických vlastností je potřeba zmínit i skutečnost, že se zvyšujícím se účinným skluzem se zvyšuje v dotykové plošce i velikost zmařené energie, která dotykovou plošku zahřívá a zároveň čistí, čímž dochází ke zlepšení součinitele adheze μ .

Velikost nejvyšší tažné síly (s ohledem na adhezi) F_{ok} je omezena hnacím dvojkolím s nejhoršími adhezními poměry, tj. které se nejdříve dostane na hranici skluzu. Takové dvojkolí začne první prokluzovat a tím omezí možnost zvyšování tažné síly na ostatních (neprokluzujících) dvojkolích. Výše uvedené vlivy jsou u daného hnacího vozidla vyjádřeny tzv. **koeficientem využití adhezní hmotnosti vozidla ε** , který lze vyjádřit vztahem [20]:

$$\varepsilon = \frac{F_{ok}}{G_a \cdot \mu_{max}} \quad [- ; N , N , -] \quad (9)$$

kde F_{ok} – nejvyšší tažná síla na obvodu kol hnacího vozidla, při níž se alespoň jedno dvojkolí hnacího vozidla dostane na mez adheze,

G_a – adhezní tíha hnacího vozidla,

μ_{max} – maximální dosažitelná hodnota součinitele adheze μ (tzv. mez adheze).

Jmenovatel tvořený součinem $G_a \cdot \mu_{max}$ udává maximální dosažitelnou tažnou sílu na obvodu hnacích kol (při níž je adhezní hmotnost hnacího vozidla plně využita). Hodnoty koeficientu ε mohou nabývat hodnot od 0 do 1, obvykle se pohybují v rozmezí 0,85 až 1,0. Koeficient ε zmenšuje velikost adhezní tažné síly a zahrnuje vlivy konstrukce na změnu rozložení tíhy na jednotlivá dvojkolí a kola, přičemž mezi hlavní vlivy patří [25]:

- klopný moment podvozků vlivem tažné síly na spřáhle,
- neodpružená hmotnost podvozku,
- zapojení trakčních motorů,
- způsob regulace výkonu,
- tvar charakteristiky trakčního motoru.

Ještě je nutné zdůraznit, že hnací moment trakčního motoru je využit především na [20]:

- **urychlení rotačních hmot G_R** , které jsou s trakčním motorem mechanicky vázány (převody ozubenými koly, kloubové hřídele, dvojkolí atd.) a nejsou přenášeny adhezí; tato složka momentu není (teoreticky) omezena,
- **urychlení hmotnosti vlakové soupravy a ostatních rotačních hmot** vyskytujících se ve vlakové soupravě G_{RV} prostřednictvím tažné síly, která je adhezí omezena.

5 Protiskluzové ochrany použité u železničních hnacích vozidel

Při pohybu hnacího kolejového vozidla po skutečné železniční dopravní cestě dochází k deformaci adhezních charakteristik z důvodu měnící se okamžité hodnoty součinitele adheze μ . S rozvojem elektrické trakce v železniční dopravě se neustále zvyšuje výkon, který se v rámci individuálního pohonu hnacího dvojkolí přenáší z trakčního motoru na hnací dvojkolí. Před několika desetiletími se jednalo o výkony cca 500 kW vztažený na jedno hnací dvojkolí, dnes se jedná o výkony cca 1 500 kW. Aby byla hnací kolejová vozidla schopna tyto výkony s ohledem na adhezi přenášet, je zapotřebí znát adhezní podmínky způsobující deformace adhezních charakteristik a vhodně je aplikovat při regulaci pohonů hnacích dvojkolí ve vazbě na účinná protiskluzová opatření. Deformaci adhezních charakteristik mohou ovlivňovat např. rychlost jízdy hnacího vozidla, existence příčného skluzu a spinu, úhel náběhu α , materiálové konstanty povrchů kol a kolejnic, nerovnosti kolejí, existence vratné větve adhezní charakteristiky, torzní kmitání pohonu atd.

5.1 Význam protiskluzových ochran u hnacích vozidel

V úvodu této kapitoly je nutné si ujasnit některé základní pojmy – prokluz a smyk [24].

Smyk dvojkolí znamená takový stav, kdy je obvodová rychlost kol hnacího dvojkolí (podstatně) nižší (v krajním případě i nulová) vůči posuvné rychlosti hnacího vozidla ve směru jeho jízdy. V případě nulové hodnoty obvodové rychlosti kol (kola hnacího dvojkolí se neotáčí) dochází ke smyku kol hnacího dvojkolí po kolejnici, což může mít za následek:

- vznik plochých míst na jízdnicích plochách smýkajících se kol,
- pokles brzdící síly při brzdění, který může vést k prodloužení zábrzdných vzdáleností.

V rámci brzdění se smyk dvojkolí týká i běžných (nehnacích) dvojkolí. K zamezení smyku dvojkolí (hnacích i nehnacích) se uplatňují různá protismyková zařízení.

Prokluz dvojkolí znamená naopak takový stav, kdy při rostoucí tažné síle nebo při zhoršení adhezních poměrů ve styku kolo – kolejnice dochází k velmi rychlému zvyšování obvodové rychlosti kol hnacího dvojkolí vůči posuvné rychlosti hnacího vozidla ve směru jeho jízdy. Vznik prokluzu hnacího dvojkolí může mít za následek:

- vysoké mechanické namáhání všech konstrukčních celků podílejících se na přenosu krouticího momentu a i k příp. překročení dovolených otáček trakčních motorů,
- opotřebení kol a kolejnic (Obr. 19 – převzat z [20]),
- vznik nebezpečných rázů ve vlakové soupravě z důvodu rychlých změn tažných či brzdících sil,

- pokles tažné síly hnacího vozidla, který může mít v krajním případě za následek i uvážnutí vlakové soupravy na trati.



Obr. 19 Příklad následků dlouhotrvajícího skluzu hnacího vozidla

K prokluzu dvojkolí může docházet pouze u hnacích vozidel, u kterých se na hnací dvojkolí přenáší nenulový krouticí moment z pohonného stroje (spalovacího nebo trakčního motoru), a vyvíjená tažná síla F_t překročí hodnotu, která odpovídá součinu hodnoty normálové (nápravové) síly působící na jedno dvojkolí Q ($Q = 2 \cdot N$) a součinitele adheze μ , tj. platí vztah $F_t > Q \cdot \mu$. K tomu může dojít nárůstem tažné síly při neměnném koeficientu adheze μ (zpravidla při rozjezdu hnacího vozidla) anebo poklesem hodnoty koeficientu adheze μ při neměnné tažné síle (zpravidla při jízdě hnacího vozidla se zhoršenými adhezními poměry např. vlivem nečistot nebo vlhkosti na kolejnicích). K zamezení prokluzu hnacích dvojkolí se používají běžná opatření a způsoby, vedoucí k obnovení (zlepšení) adhezních schopností hnacích dvojkolí hnacího vozidla (např. včasné snížení tažné síly, sypání písku na kolejnice, mírné přibrzdění mechanickou brzdou, účinné tlumení dynamických jevů v trakčním pohonu atd.). Kromě toho se u hnacích vozidel uplatňují různá konstrukční řešení, která mají snížit (v ideálním případě zcela eliminovat) změny nápravových sil, ke kterým dochází především při rozjezdech s vlakovými soupravami velkých hmotností. Hnací vozidla se též vybavují tzv. protiskluzovou ochranou, jejímž úkolem je chránit zařízení hnacího vozidla před nebezpečnými následky vzniklého skluzu dvojkolí, tj. při vzniku skluzu hnacího dvojkolí provést taková opatření, aby bylo v co možná nejkratší době obnoveno adhezní valení hnacích dvojkolí po kolejnicích. K zásahu protiskluzové ochrany dochází obvykle až po vzniku skluzu, proto zásah musí být velmi rychlý a účinný (zpravidla výrazným snížením tažné síly hnacího vozidla), aby se zabránilo příliš velkému zvýšení rychlosti otáčení trakčního motoru a potažmo i hnacího dvojkolí (vznik opotřebení

jízdních ploch kol a dlouhá doba nutná k obnovení adhezního valení prokluzujícího dvojkolí). Protiskluzová ochrana pracuje správně pouze v případě lokálního zhoršení adhezních podmínek, není však schopná zabránit skluzu hnacího dvojkolí. V ostatních případech musí bezprostředně následovat zásah obsluhy (strojvedoucího) hnacího vozidla vedoucí ke snížení tažné síly.

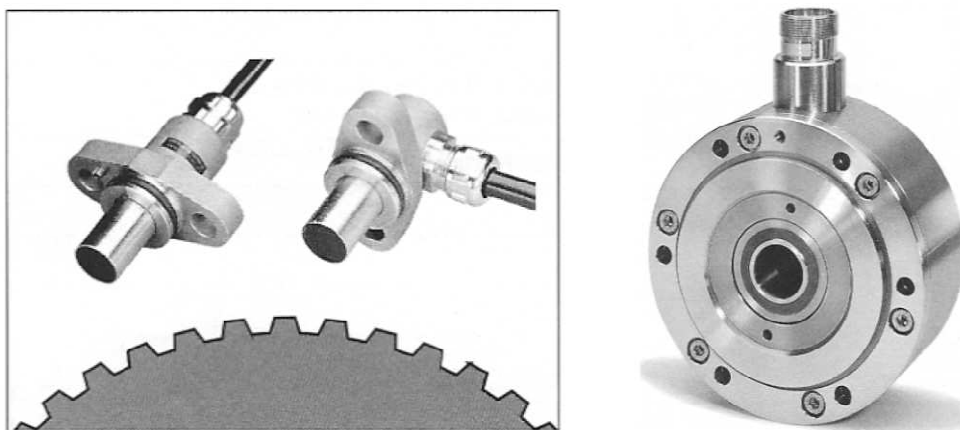
Průběh zásahu protiskluzové ochrany by však měl být takový, aby bezpečně a rychle odstranil vzniklý prokluz hnacího dvojkolí a obnovil adhezní valení dvojkolí po koleji, nezpůsobil neustálé opakování prokluzu dvojkolí a nedocházelo k velkým a rychlým změnám tažné síly vyvolávající dynamické rázy ve vlakové soupravě či jen v samotném hnacím vozidle.

5.2 Realizace protiskluzových ochran u hnacích vozidel

Aby se zabránilo prokluzu hnacích dvojkolí, zejména při rozjezdech vlaků velké hmotnosti, popř. při špatných povětrnostních podmínkách, a tím i následnému poškození trakčních motorů, jsou především hnací vozidla elektrické trakce a vozidla motorové trakce s elektrickým přenosem výkonu vybavena protiskluzovými ochranami. Hnací dvojkolí, které přenáší tažnou nebo brzdou sílu, se trvale nachází v užitečném skluzu. U trakčních motorů zapojených do série dochází při odlehčení některého hnacího dvojkolí nebo při snížení koeficientu adheze některého dvojkolí k rozdílu rychlosti otáčení mezi jednotlivými trakčními motory, který se projevuje nerovnoměrným rozdělením napětí mezi trakčními motory zapojenými do série. Trakční motor pohánějící odlehčené dvojkolí vytváří vyšší indukované napětí a tím na sebe přebírá napětí trakčního motoru neklouzajícího dvojkolí. Prokluz hnacího dvojkolí se projevuje dalším zvýšením obvodové rychlosti (rychlosti otáčení) prokluzujícího dvojkolí, což může bez aktivace jakýchkoliv opatření vést až k destrukci trakčního motoru. Ke zjištění prokluzu hnacích dvojkolí se využívají různé metody, které můžeme rozdělit na přímé a nepřímé. U přímých metod [20] se vychází z měření rychlosti otáčení hnacích dvojkolí využitím různých otáčkových (inkrementálních) čidel (Obr. 20) pracujících zpravidla na dvou principech – optickém (paprsek je přerušován výřezy nebo průhlednými ploškami clonky) nebo oscilátorovém (obsahují oscilátor, jehož oscilace jsou tlumeny při průchodu čela zubu pod cívkou oscilátoru).

Čidla však umožňují změřit pouze úhlovou rychlost hnacího dvojkolí, která se od skutečné posuvné rychlosti liší o účinný skluz anebo o velikost rozdílu rychlostí při prokluzu. V rámci přímé metody se používá jednak princip založený na měření zrychlení dvojkolí za předpokladu, že existuje dostatečně velký rozdíl mezi maximálním provozním zrychlením a zrychlením dvojkolí při skluzu, a jednak se vychází přímo z velikosti skluzové rychlosti jako rozdílu rychlosti prokluzujícího dvojkolí oproti vhodně zvolené vztažné rychlosti. Nejnovějším způsobem zjišťování rychlosti vůči okolí je použití snímačů na principu Dopplerova jevu

(zpracování rozdílu mezi vyzářeným a odraženým signálem). U nepřímých metod se ke zjištění skluzu hnacích dvojkolí používá měření jiných parametrů – měření rozdílu napětí na kotvách trakčních motorů zapojených do série či měření rozdílu proudů u trakčních motorů zapojených paralelně. Nepřímé metody [20] se využívají zejména u hnacích vozidel se stupňovitou regulací tažné síly a stejnosměrnými sériovými trakčními motory.



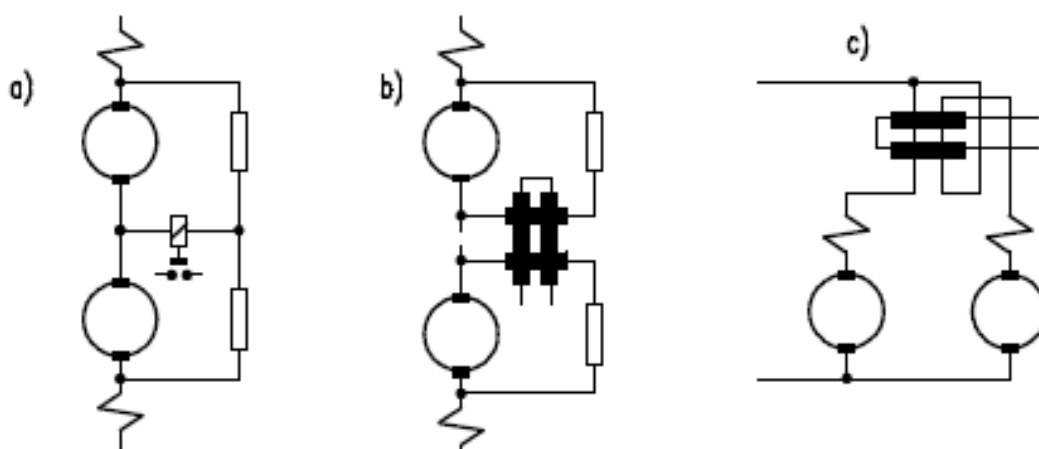
Obr. 20 Otáčková čidla Lenord-Bauer

U starších elektrických hnacích vozidel stejnosměrné trakce tvořila protiskluzovou ochranu skluzová relé, která měla na společném magnetickém jádru umístěné 2 napěťové cívky vinuté proti sobě tak, aby se jejich účinek při stejném napětí rušil. Relé byla zapojena paralelně ke kotvám trakčních motorů, přičemž vždy jedno relé bylo zapojeno na dvě kotvy trakčních motorů jedné motorové skupiny. Pokud došlo v rámci motorové skupiny ke skluzu jedné nápravy a tím ke zvýšení její rychlosti otáčení, vytvořil se rozdíl napětí na kotvách obou trakčních motorů odpovídající rozdílu rychlosti otáčení kotev trakčních motorů (hnacích dvojkolí), na který skluzové relé zareagovalo. Rozdíl napětí se zvyšoval úměrně rozdílu rychlostí otáčení kotev trakčních motorů. Při rozdílu napětí cca 220 V byl skluz signalizován na stanovišti strojvedoucího zvukem houkačky, při rozdílu napětí cca 900 V došlo k vypnutí hlavního vypínače hnacího vozidla. Největší význam měla tato protiskluzová ochrana zejména při jízdě v režimu, kdy byly všechny trakční motory řazeny do série. U trakčního motoru prokluzujícího dvojkolí klesne hodnota protékajícího proudu, čímž zároveň klesne proud protékající i ostatními trakčními motory zařazenými do série a tím poklesne tažná síla hnacího vozidla. Trakční motor prokluzujícího dvojkolí by však svou rychlost otáčení stále zvyšoval, protože napětí na něm je vyšší než u ostatních trakčních motorů (při stejné hodnotě protékajícího proudu), což by mohlo mít za následek poškození trakčního motoru.

Tato původní protiskluzová ochrana byla nahrazena jednodušším provedením pracujícím na obdobném principu. V každé motorové skupině bylo použito skluzové relé s jednou cívkou a dvěma kotvami v můstkovém zapojení (Obr. 21a) [20], které je protékáno proudem úměrným rozdílu napětí obou trakčních motorů. Toto relé porovnává absolutní

velikosti napětí na jednotlivých kotvách trakčních motorů a zasáhne v případě prokluzu některého hnacího dvojkolí, tj. dojde-li k nepřipustným rozdílům napětí na kotvách trakčních motorů příslušné motorové skupiny. Při malém rozdílu hodnot napětí (220 až 270 V) se signalizuje prokluz strojvedoucímu signálním světlem na ovládacím pultu a zároveň bývá v rámci zabudovaného automatického pískování aktivováno sypání písku před kola hnacího (prokluzujícího) dvojkolí, při velkém rozdílu napětí (cca 900 až 1000 V) nastane vypnutí hlavního vypínače hnacího vozidla. Mezi cívkou a kontakty relé je provedeno galvanické oddělení od řídicích obvodů.

Dalším způsobem protiskluzové ochrany je použití transduktoru, kdy je relé zapojeno v pracovním obvodu transduktoru a je tedy galvanicky odděleno, což umožňuje, aby porovnávané kotvy trakčních motorů měly libovolné potenciály proti zemi (např. při skupinovém řazení hnacího vozidla se 6 nebo 8 trakčními motory). Transduktorová skluzová ochrana (Obr. 21b) [20] porovnává napětí na dvou do série zapojených kotvách trakčních motorů. Rozdíl napětí na kotvách dvou trakčních motorů získaný můstkovým zapojením kotev trakčních motorů a rezistorů se převádí na úměrné proudy, které řídí příslušný transduktor. Transduktory jsou sériové a pracují v režimu s velkým odporem v řídicím obvodu. Proud v pracovním vinutí je úměrný rozdílu proudů vinutí řídicích. Při skluzu vzniklý rozdíl napětí oproti kotvě neklouzajícího dvojkolí způsobí rozdíl řídicích proudů a tím vzrůst pracovního proudu příslušného transduktoru, což se projeví rozvážením střídavého můstku, napětí na můstku se zvyšuje a je úměrné rozdílu napětí na kotvách trakčních motorů příslušné motorové skupiny. Při začínajícím skluzu (rozdíl napětí cca 160 až 180 V) zapíná ochrana signalizaci strojvedoucímu, při velkém skluzu (rozdíl napětí cca 600 až 800 V) vypíná hlavní vypínač. Skluzová ochrana pracuje stejně jak v režimu jízdy, tak i v režimu brzdy, kdy reaguje na rozdíl napětí kotev trakčních motorů, způsobený smykem některého hnacího dvojkolí.



Obr. 21 Základní principy zapojení protiskluzových ochran hnacích vozidel

U starších elektrických hnacích vozidel střídavé trakce, u kterých jsou zpravidla trakční motory zapojeny paralelně, se též používal transduktor, přičemž řídicí vinutí transduktoru představují obvykle přímo průvleky vodičů s trakčním proudem (Obr. 21c). [20]

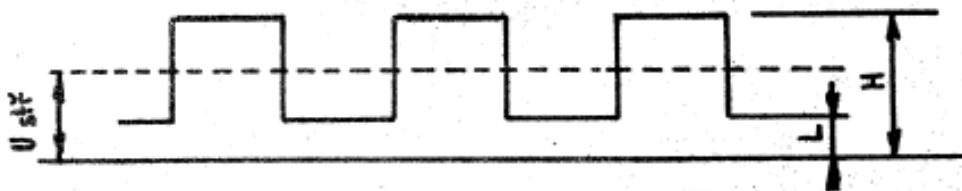
U novějších systémů protiskluzových zařízení je základní vstupní informací zpravidla rychlost otáčení hnacích dvojkolí, k jejímuž zjišťování se používají otáčková čidla různých konstrukčních provedení pracující na různých principech. Hlavními požadavky na otáčková čidla jsou:

- jejich správná funkce v intervalu od nulové do maximální rychlosti otáčení,
- jejich vysoká přesnost (alespoň 0,05 %) z důvodu schopnosti vyhodnocovat s dostatečnou přesností rozdíly rychlosti otáčení v oblasti účinného skluzu,
- robustní provedení z důvodu velké odolnosti při jízdě hnacího vozidla po skutečné koleji vysokou rychlostí a za nepříznivých povětrnostních podmínek,
- dlouhodobá spolehlivost v extrémních provozních poměrech.

Princip protiskluzové ochrany může spočívat např. v měření zrychlení dvojkolí za podmínky, že rozdíl mezi maximálním provozním zrychlením a zrychlením dvojkolí při skluzu je dostatečně velký. Ze změřené rychlosti otáčení trakčního motoru nebo kola dvojkolí se určí zrychlení, jehož hodnota se porovnává s hodnotou maximálního provozního zrychlení. V případě překročení této hodnoty se sníží hodnota tažné síly působící na příslušné hnací dvojkolí.

Jinou možností je vycházet přímo z velikosti skluzové rychlosti (tj. rozdílu rychlosti otáčení klouzajícího hnacího dvojkolí vůči vhodné zvolené vztažné rychlosti otáčení). Rychlost otáčení klouzajícího dvojkolí se odečte od rychlosti vztažné a překročí-li zjištěný rozdíl nastavenou hodnotu, nastane opět snížení tažné síly působící na příslušné (klouzající) dvojkolí.

Protiskluzová ochrana pracující na výše zmíněném principu nepřetržitě za jízdy hnacího vozidla porovnává rychlost otáčení všech hnacích dvojkolí hnacího vozidla, což se provádí vyhodnocením výstupních signálů z otáčkových čidel umístěných v nástavcích ložiskových skříní jednotlivých hnacích dvojkolí. Výstupní signál z otáčkových čidel má obdélníkový tvar tvořený 2 úrovněmi (úroveň L a H – Obr. 22) a jeho frekvence je úměrná rychlosti otáčení hnacího dvojkolí. [20]



Obr. 22 Charakteristický průběh výstupního signálu z otáčkového čidla

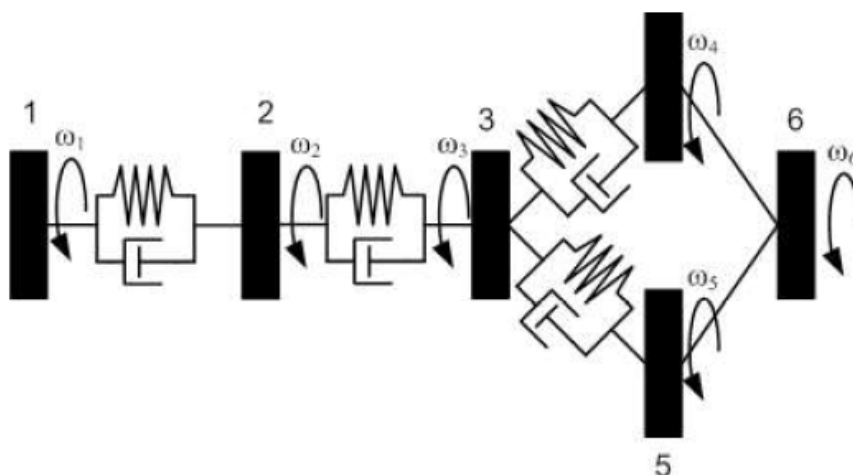
Dvojkolí, které má nejnižší rychlost otáčení (v režimu jízdy) anebo nejvyšší rychlost otáčení (v režimu brzdy) se označuje jako vztažné a s jeho okamžitou rychlostí otáčení se porovnávají okamžité rychlosti otáčení ostatních hnacích dvojkolí. Rychlost otáčení vztažného dvojkolí a rozdíl rychlosti otáčení mezi vztažným a ostatními hnacími dvojkolími jsou základními výstupními signály protiskluzové ochrany a slouží k ovlivňování jízdy hnacího vozidla prostřednictvím ostatních elektronických obvodů (regulátorů) hnacího vozidla. Výstupní impulsní signál rychlosti otáčení vztažného hnacího dvojkolí je následně v obvodech tzv. regulátoru rychlosti vyhodnocen, čímž se získává údaj o skutečné rychlosti hnacího vozidla, který je využíván pro další účely. Při skluzu (tj. zvýšení rychlosti otáčení klouzajícího dvojkolí) se na výstupu protiskluzové ochrany objeví frekvenční signály (v závislosti na tom, ve kterém podvozku dojde k prokluzu dvojkolí), které jsou přivedeny do tzv. regulátoru tahu a ten způsobí pokles kotevního proudu tekoucího do trakčních motorů příslušného podvozku. V režimu brzdy protiskluzová ochrana na základě signálu přivedeného z tzv. centrálního řídicího členu vyhodnocuje hnací dvojkolí, které se při smyku otáčí pomaleji (smýká se a má nižší rychlost otáčení) oproti ostatním hnacím dvojkolím hnacího vozidla. I v tomto případě jsou přivedeny signály do regulátoru tahu, který způsobí u dvojkolí pohybující se smykem po koleji snížení brzdících momentů příslušných trakčních motorů (trakční motory pracují v režimu elektrodynamické brzdy).

6 Model protiskluzové ochrany lokomotivy

V návaznosti na předchozí kapitoly týkající se adheze a základních principů protiskluzových ochran je náplní této kapitoly vlastní vytvoření modelu protiskluzové ochrany. Aby bylo možné sestavit model protiskluzové ochrany, je potřeba nejdříve mít k dispozici mechanický model trakčního pohonu, který bude za předpokladu určitých zjednodušení simulovat silové působení vyskytující se v trakčním pohonu elektrické lokomotivy.

6.1 Mechanický popis soustavy trakčního pohonu

Pro účely této diplomové práce byl vytvořen mechanický model trakčního pohonu skutečné elektrické lokomotivy s klasickou nápravovou převodovkou tvořenou 2 čelními spoluzabírajícími ozubenými koly. Model pohonu je zjednodušený a pro případ pohonu jednoho hnacího dvojkolí (Obr. 23 [26]) zahrnuje elektrický trakční motor, resp. rotor trakčního motoru (poz. 1), nápravovou převodovku (resp. pastorek (poz. 2) a velké ozubené kolo (poz. 3)) a obě kola hnacího dvojkolí s tím, že kolo umístěné blíže velkému ozubenému kolu nalisovanému na hnací nápravě se označuje jako přímo řízené kolo (poz. 4) a kolo umístěné dále od velkému ozubenému kolu se označuje jako nepřímo řízené kolo (poz. 5), přičemž černou barvou vyplněné obdélníky na obrázku představují hmoty jednotlivých těles trakčního pohonu, včetně hmoty představující vlakovou soupravu (poz. 6). Při sestavování mechanického modelu trakčního pohonu byl vzat jako výchozí model pohonu (včetně příslušného matematického popisu formou diferenciálních rovnic) uvedený v [26].



Obr. 23 Principiální schéma mechanického modelu trakčního pohonu

Kromě hmot jednotlivých těles jsou na obrázku znázorněny i vazby, kterými jsou jednotlivá tělesa vzájemně vázána – torzní tuhost (v dalším textu označena písmenem c) a součinitel lineárního tlumení (v dalším textu označen písmenem d). Aby bylo možné

mechanický model trakčního pohonu vytvořit pomocí nějakého vhodného počítačového softwaru, je zapotřebí nejprve model matematicky popsat vhodnou soustavou diferenciálních rovnic. Účelné se v tomto případě jeví zvolit momentové rovnice. Pro každé jedno těleso trakčního pohonu je tedy vytvořena momentová rovnice, jejíž obecný tvar lze napsat takto:

$$J \cdot \ddot{\varphi} + d \cdot \dot{\varphi} + c \cdot \varphi = M \quad (10)$$

- kde J – moment setrvačnosti tělesa k dané ose [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$],
 d – součinitel lineárního tlumení [$\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$],
 c – torzní tuhost [$\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$],
 M – krouticí moment [$\text{N} \cdot \text{m}$],
 φ – úhlová výchylka [rad],
 $\dot{\varphi}$ – úhlová rychlost [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$],
 $\ddot{\varphi}$ – úhlové zrychlení [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}$]

Při sestavování momentových rovnic se používá tzv. metoda uvolnění, při které se z celé soustavy (celého řetězce) příslušné těleso vyčlení včetně všech silových vazeb se sousedními tělesy a pro každé takto vyčleněné těleso se sestaví momentová rovnice obsahující veškeré momenty působící na dané těleso. Protože nejsou zpravidla všechna tělesa soustavy umístěna na společné ose otáčení (ve společném souřadném systému), je zároveň nutné provést i tzv. redukci (přepočítání) některých parametrů na společnou osu rotace – v našem případě na osu nápravy hnacího dvojkolí. Redukce parametrů se provádí přepočtem pomocí převodového poměru i (poměr počtu zubů velkého ozubeného kola a pastorku). Redukce momentu setrvačnosti J rotoru trakčního motoru do osy dvojkolí vyplývá z rovnosti kinetické energie před a po redukci. Redukce torzní tuhosti c vyplývá z rovnosti deformací (úhlových výchylek) velkého ozubeného kola před a po redukci, popř. srovnáním potenciálních energií soustavy před a po redukci. Obdobně platí i pro redukci součinitele lineárního tlumení d . Po sestavení rovnic pro jednotlivá tělesa trakčního pohonu (celé soustavy) pro jedno hnací dvojkolí obdržíme následující soustavu diferenciálních rovnic, přičemž v rovnicích se vychází z předpokladu, že jednotlivá tělesa vykonávají rotační pohyb:

$$J_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 + d_{12} \cdot (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) + c_{12} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) = M_{TM} \quad (11)$$

$$J_2 \cdot \ddot{\varphi}_2 + d_{12} \cdot (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1) + d_{23} \cdot (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) + c_{12} \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) + c_{23} \cdot (\varphi_2 - \varphi_3) = 0 \quad (12)$$

$$J_3 \cdot \ddot{\varphi}_3 + d_{23} \cdot (\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_2) + d_{34} \cdot (\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_4) + d_{35} \cdot (\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_5) + c_{23} \cdot (\varphi_3 - \varphi_2) + c_{34} \cdot (\varphi_3 - \varphi_4) + c_{35} \cdot (\varphi_3 - \varphi_5) = 0 \quad (13)$$

$$J_4 \cdot \ddot{\varphi}_4 + d_{34} \cdot (\dot{\varphi}_4 - \dot{\varphi}_3) + d_{46} \cdot (\dot{\varphi}_4 - \dot{\varphi}_6) + c_{34} \cdot (\varphi_4 - \varphi_3) = -M_{T46} \quad (14)$$

$$J_5 \cdot \ddot{\varphi}_5 + d_{35} \cdot (\dot{\varphi}_5 - \dot{\varphi}_3) + d_{56} \cdot (\dot{\varphi}_5 - \dot{\varphi}_6) + c_{35} \cdot (\varphi_5 - \varphi_3) = -M_{T56} \quad (15)$$

$$J_6 \cdot \ddot{\varphi}_6 + d_{46} \cdot (\dot{\varphi}_6 - \dot{\varphi}_4) + d_{56} \cdot (\dot{\varphi}_6 - \dot{\varphi}_5) = M_{T46} + M_{T56} \quad (16)$$

Výše uvedenou soustavu diferenciálních rovnic mírně upravíme (osamostatníme členy s momentem setrvačnosti J), přičemž v poslední rovnici soustavy nahradíme rotační pohyb pohybem posuvným (včetně zahrnutí vozidlového odporu lokomotivy O_L), což více odpovídá reálným podmínkám pohybu hnacího vozidla (celé vlakové soupravy) po koleji z pohledu nezávislého pozorovatele stojícího vně mimo kolej. Po úpravách potom dostáváme soustavu následujících rovnic:

$$J_1 \cdot \ddot{\varphi}_1 = M_{TM} - d_{12} \cdot (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) - c_{12} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) \quad (17)$$

$$J_2 \cdot \ddot{\varphi}_2 = d_{12} \cdot (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) - d_{23} \cdot (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) + c_{12} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2) - c_{23} \cdot (\varphi_2 - \varphi_3) \quad (18)$$

$$J_3 \cdot \ddot{\varphi}_3 = d_{23} \cdot (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) - d_{34} \cdot (\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_4) - d_{35} \cdot (\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_5) + c_{23} \cdot (\varphi_2 - \varphi_3) - c_{34} \cdot (\varphi_3 - \varphi_4) - c_{35} \cdot (\varphi_3 - \varphi_5) \quad (19)$$

$$J_4 \cdot \ddot{\varphi}_4 = d_{34} \cdot (\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_4) - d_{46} \cdot (\dot{\varphi}_4 - \dot{\varphi}_6) + c_{34} \cdot (\varphi_3 - \varphi_4) - M_{T46} \quad (20)$$

$$J_5 \cdot \ddot{\varphi}_5 = d_{35} \cdot (\dot{\varphi}_3 - \dot{\varphi}_5) - d_{56} \cdot (\dot{\varphi}_5 - \dot{\varphi}_6) + c_{35} \cdot (\varphi_3 - \varphi_5) - M_{T56} \quad (21)$$

$$m_6 \cdot \ddot{x}_6 = F_{T46} + F_{T56} - O_L \quad (22)$$

kde M_{T46} – moment vyvolaný tažný silou F_{T46} vzniklou na hnacím kole (poz. 4) [Nm],

M_{T56} – moment vyvolaný tažný silou F_{T56} vzniklou na hnacím kole (poz. 5) [Nm],

M_{TM} – moment hnací trakčního motoru (na hřídeli trakčního motoru) [Nm],

m_6 – hmotnost hnacího vozidla (lokomotivy) [kg],

O_L – vozidlový odpor lokomotivy [N],

\ddot{x}_6 – zrychlení posuvného pohybu hnacího vozidla (lokomotivy) [$m \cdot s^{-2}$],

$$M_{T46} = r \cdot F_{T46} = r \cdot N_{T46} \cdot \mu (\Delta V) \quad (23)$$

$$M_{T56} = r \cdot F_{T56} = r \cdot N_{T56} \cdot \mu (\Delta V) \quad (24)$$

kde N_{T46} – svislá kolová síla působící ve styku hnacího kola (poz. 4) s kolejnicí [N],

N_{T56} – svislá kolová síla působící ve styku hnacího kola (poz. 5) s kolejnicí [N],

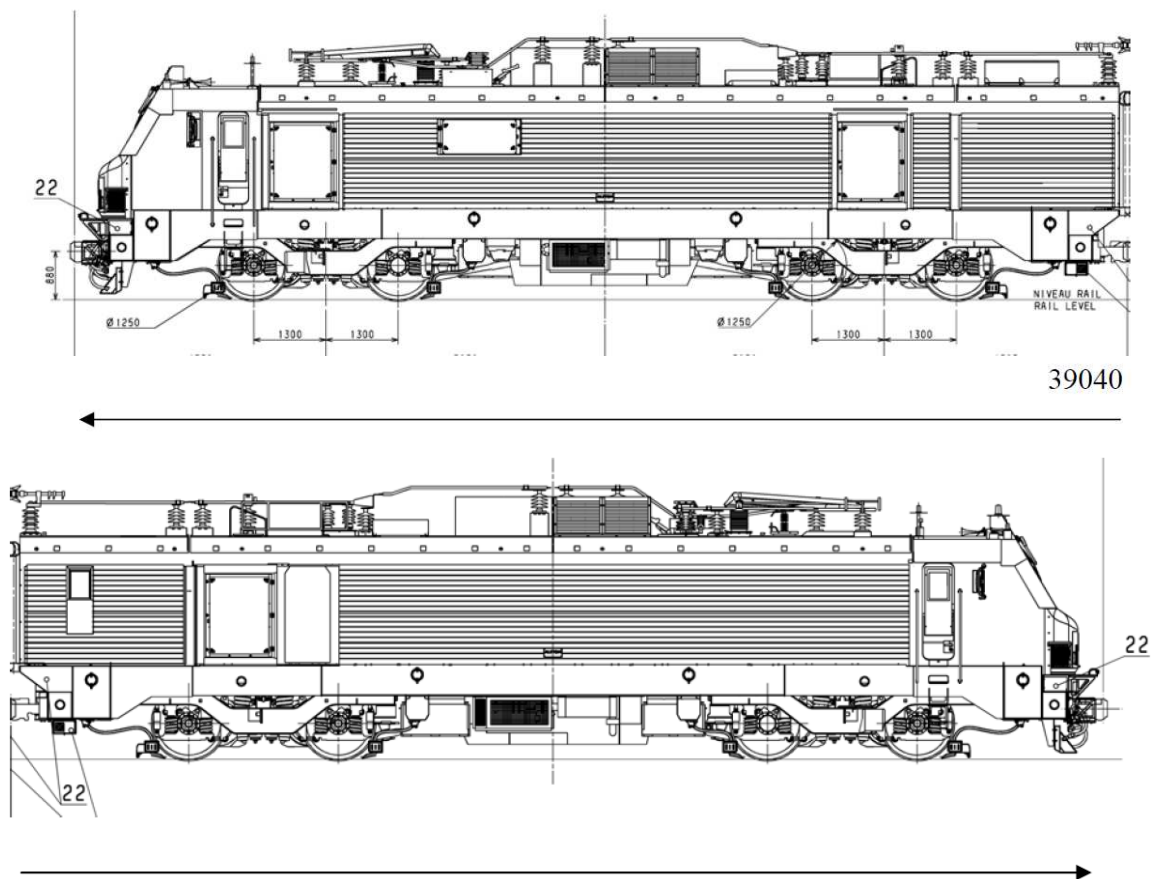
μ – součinitel adheze [–], $\mu = f(\Delta V)$

r – poloměr hnacího kola [m]

6.2 Technické parametry skutečného trakčního pohonu

Abychom mohli mechanický model trakčního pohonu dosud vyjádřený soustavou matematických diferenciálních rovnic realizovat v nějakém vhodném programovém prostředí, musíme znát hodnoty základních parametrů jednotlivých těles tvořících soustavu trakčního pohonu. Model trakčního pohonu bude vytvořen na základě parametrů reálně vyrobené a provozované elektrické lokomotivy řady HXD2 (Obr. 24, 25) provozované v různých verzích

u Čínských železnic, k níž byly Katedře elektrických pohonů a trakce FEL ČVUT poskytnuty výrobcem relevantní údaje (Tab. 2) nutné k vytvoření funkčního modelu trakčního pohonu.

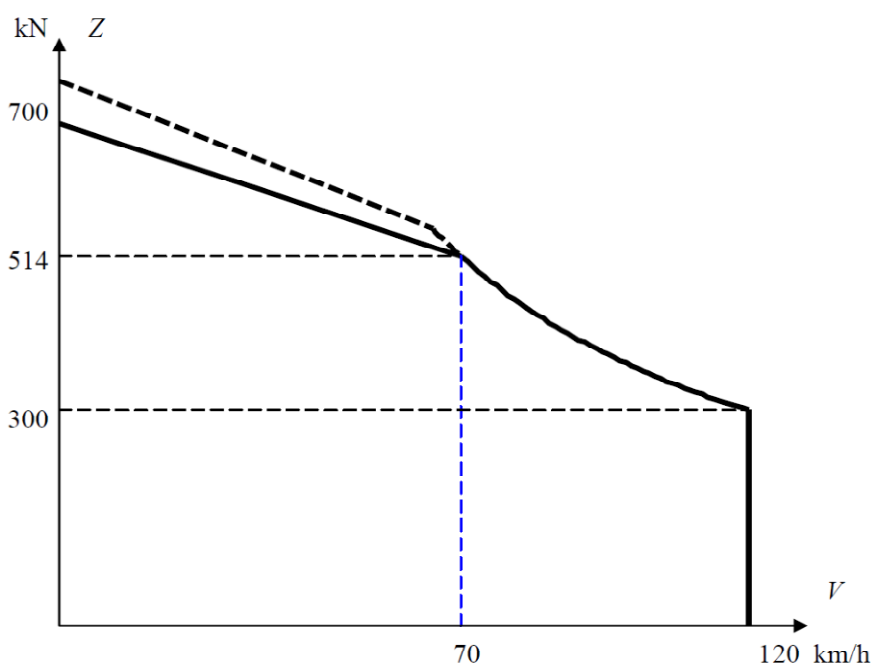


Obr. 24 Typový náčrt dvoudílné elektrické lokomotivy řady HXD2



Obr. 25 Dvoudílná elektrická lokomotiva Čínských železnic řady HXD2

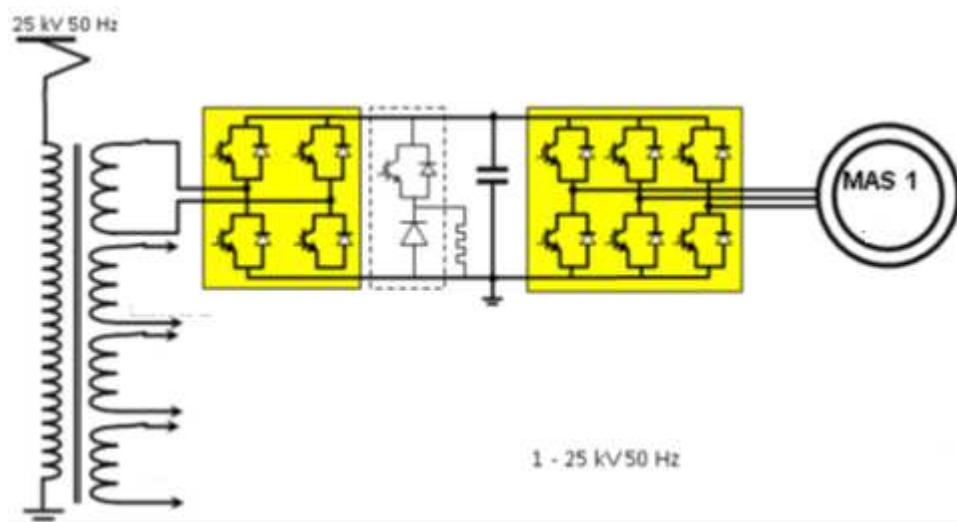
V základní (původní) verzi se jedná o dvojdílnou elektrickou lokomotivu (Obr. 24, 25) určenou především pro dopravu nákladních vlaků velkých hmotností (zejména přeprava uhlí) na tratích s normálním rozchodem kolejí 1435 mm a napájených střídavým proudem o napětí 25 kV 50 Hz. Celkový jmenovitý výkon celé lokomotivy činí 9,6 MW, přičemž maximální rychlost je $120 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Uspořádání hnacích náprav každého dílu lokomotivy je Bo'Bo'.



Obr. 26 Trakční charakteristika dvojdílné elektrické lokomotivy řady HXD2

Na Obr. 26 je znázorněna zjednodušená (obalová) trakční charakteristika lokomotivy platná pro celou lokomotivu (pro oba díly) s vyznačením hodnot odpovídajících režimu trvalého provozu ($V_{\infty} = 70 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ a $F_{T\infty} = 514 \text{ kN}$).

Trakční pohon lokomotivy je zajišťován tlapovými asynchronními trakčními motory napájenými prostřednictvím měničů tvořených IGBT tranzistory, přičemž každý trakční motor pohání vždy jednu hnací nápravu (individuální pohon hnacích náprav) pomocí mechanického převodu čelními ozubenými koly ($i = z_2/z_1 = 120/23 = 5,2174$). Lokomotiva je též vybavena výkonnou elektrodynamickou brzdou s možností rekuperace. Na Obr. 27 je znázorněno principiální schéma uspořádání hlavního trakčního obvodu lokomotivy (je uvedeno schéma pouze pro jeden díl lokomotivy a v něm zapojení pouze pro napájení jednoho trakčního motoru, přičemž pro druhý díl a ostatní trakční motory je zapojení analogické). Na obrázku je znázorněn hlavní trakční transformátor s vinutími na sekundární straně pro napájení obvodů jednotlivých trakčních motorů, vstupní měnič (měnič na straně sítě), stejnosměrný meziobvod s brzdovým rezistorem a výstupní měnič - střídač (měnič na straně motoru) a napájený asynchronní motor (označení MAS 1).



Obr. 27 Principiální schéma zapojení trakčních obvodů lokomotivy řady HXD2

6.3 Mechanický model trakčního pohonu lokomotivy

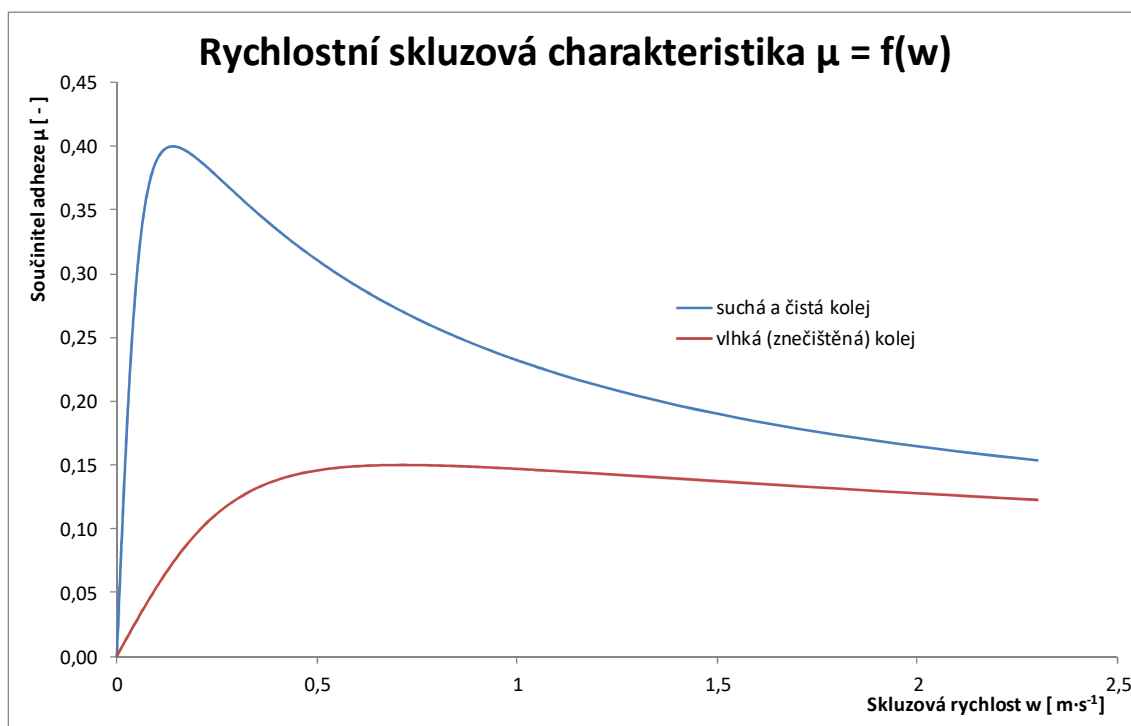
K vytvoření mechanického modelu trakčního pohonu bylo zvoleno programové prostředí MATLAB (verze 2007) a v jeho rámci kompatibilní software PLECS (licence na používání programů pro studijní účely poskytnutá FEL ČVUT). V rámci určitého zjednodušení a zejména dosažení větší přehlednosti celého modelu je model trakčního pohonu vytvořen pouze pro jeden díl lokomotivy, tj. pro 4 hnací nápravy. Lze předpokládat, že výsledky získané pro jeden díl lokomotivy budou téměř shodné (velmi podobné) i v případě uvažování obou dílů lokomotivy.

	Měrná jednotka	Hodnota
Počet zubů pastorku z_1	počet	23
Počet zubů velkého ozubeného kola z_2	počet	120
Průměr kola hnacího dvojkolí D	m	1,25
Moment setrvačnosti asynchronního trakčního motoru J1	kg·m ²	25
Moment setrvačnosti pastorku J2	kg·m ²	0,21
Moment setrvačnosti velkého ozubeného kola převodovky J3	kg·m ²	57,6942
Moment setrvačnosti přímo řízeného hnacího kola hnacího dvojkolí J4	kg·m ²	174,3412
Moment setrvačnosti nepřímo řízeného hnacího kola hnacího dvojkolí J5	kg·m ²	175,5267
Moment setrvačnosti 1 dílu lokomotivy	kg·m ²	98 000
Hmotnost 1 dílu lokomotivy M_{L1}	kg	98 000
Torzní tuhost vazby rotor trakčního motoru - pastorek c_{12}	N·m·rad ⁻¹	4 000 000
Součinitel lineárního tlumení vazby rotor trakčního motoru - pastorek d_{12}	N·m·s·rad ⁻¹	40
Torzní tuhost vazby pastorek - velké ozubené kolo c_{23}	N·m·rad ⁻¹	15 000 000
Součinitel lineárního tlumení vazby pastorek - velké ozubené kolo d_{23}	N·m·s·rad ⁻¹	4 730
Torzní tuhost vazby velké ozubené kolo - přímo řízené hnací kolo hnacího dvojkolí c_{34}	N·m·rad ⁻¹	137 000 000
Součinitel lineárního tlumení vazby velké ozubené kolo - přímo řízené hnací kolo hnacího dvojkolí d_{34}	N·m·s·rad ⁻¹	74
Torzní tuhost vazby velké ozubené kolo - nepřímo řízené hnací kolo hnacího dvojkolí c_{35}	N·m·rad ⁻¹	16 600 000
Součinitel lineárního tlumení vazby velké ozubené kolo - nepřímo řízené hnací kolo hnacího dvojkolí d_{35}	N·m·s·rad ⁻¹	74

Tab. 2 Základní technické parametry trakčního pohonu lokomotivy řady HXD2

Mechanický model trakčního pohonu (dále jen „model“) je vytvořen tak, že plně respektuje soustavu diferenciálních rovnic uvedené v kapitole 6.1, které popisují mechaniku trakčního pohonu. V Tab. 2 jsou uvedeny hodnoty parametrů, které se vyskytují v soustavě diferenciálních rovnic a jsou zapotřebí k tomu, abychom mohli sestavit funkční a smysluplný model lokomotivy (jednoho jejího dílu).

Aby bylo možné v modelu nasimulovat klouzání hnacích dvojkolí, je v modelu zpracována rychlostní skluzová charakteristika, umožňující sledovat a vyhodnocovat chování modelu trakčního pohonu lokomotivy zejména při rozjezdu. Rychlostní skluzová charakteristika (Obr. 28) je v modelu zahrnuta ve dvou verzích – pro suchou a čistou kolej ($\mu_{max} = 0,4$) a pro vlhkou (znečištěnou) kolej ($\mu_{max} = 0,15$).



Obr. 28 Rychlostní skluzová charakteristika použitá v modelu trakčního pohonu

Rychlostní skluzová charakteristika $\mu = f(w)$, tj. závislost mezi skluzovou rychlostí w a součinitelem adheze μ , je v modelu vytvořena pomocí rovnice označované jako **Magic formula**, která byla vyvinuta v 80. letech minulého století na Technické univerzitě Delft ve spolupráci s automobilkou Volvo především pro simulaci skluzových charakteristik kol s pneumatikami na silničním povrchu. Jedná se o univerzální semi-empirický vztah vhodný pro aproximování experimentálně zjištěných skluzových charakteristik (pro podélnou a boční sílu i vratný moment). V obecném vyjádření má Magic formula tvar ($y = f(x)$):

$$y = D \cdot \sin\{C \cdot \arctg[B \cdot x - E \cdot (B \cdot x - \arctg B \cdot x)]\} \quad (25)$$

kde jednotlivé konstanty znamenají:

- B – faktor tuhosti
- C – faktor tvaru
- D – maximální hodnota
- E – faktor zakřivení

V této práci je použit vztah Magic formula k simulování skluzových charakteristik kol hnacích dvojkolí lokomotivy pro jízdu po ocelových kolejnicích. Přizpůsobení vztahu Magic formula pro oblast kolejových vozidel provedeme vhodným výběrem hodnot příslušných konstant (B, C, D, E) tak, abychom tvar a průběh vzniklé skluzové charakteristiky lokomotivy co nejvíce přiblížili reálným skluzovým charakteristikám kolejových vozidel. Pro skluzové charakteristiky v modelu (Obr. 28) budeme tedy uvažovat následující koeficienty:

a) pro případ **čisté a suché koleje**:

$$B = 10; C = 1,9; D = 0,4; E = 0,7;$$

b) pro případ **vlhké (znečištěné) koleje**:

$$B = 2; C = 1,9; D = 0,15; E = 0,73;$$

6.3.1 Model trakčního pohonu lokomotivy

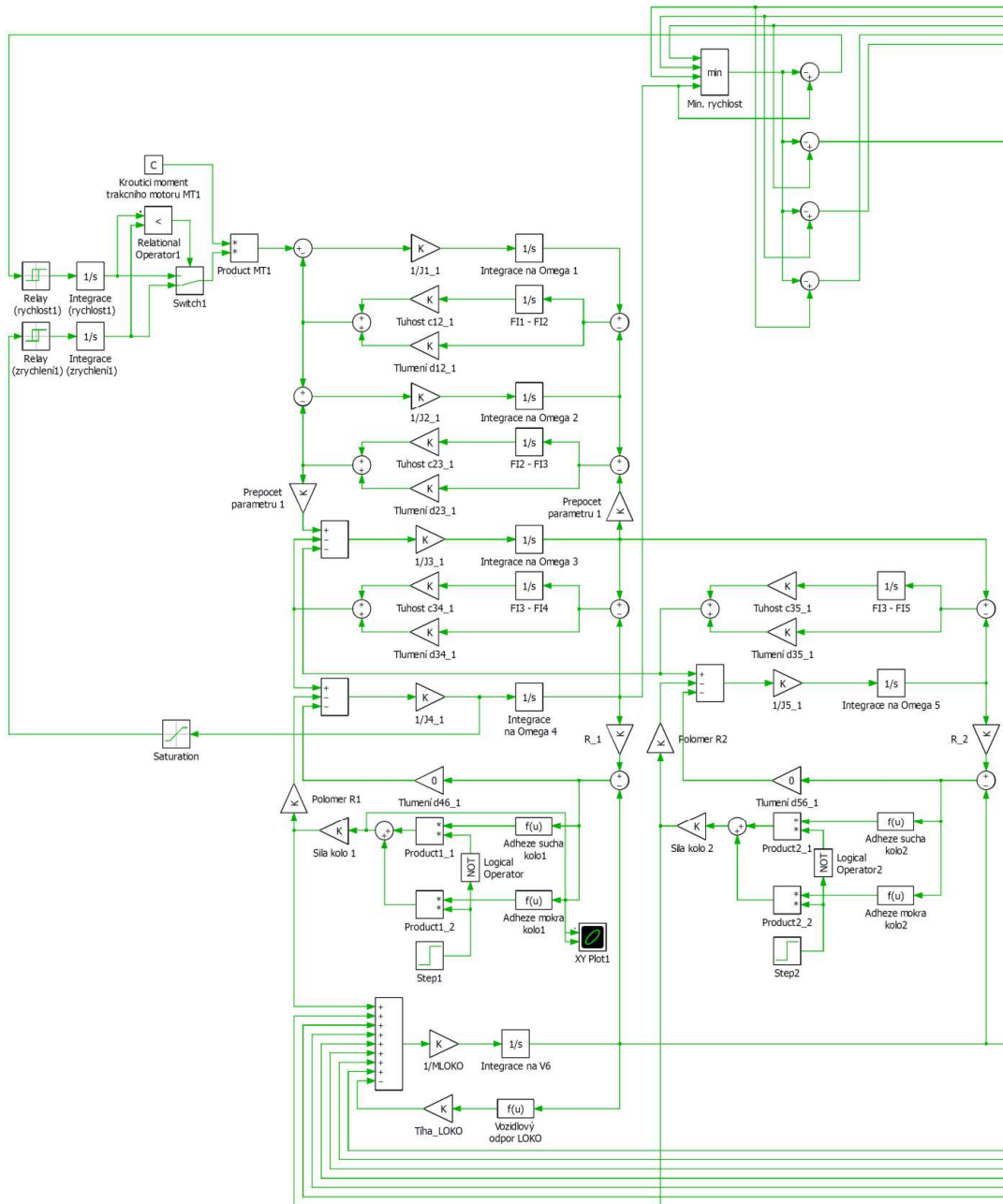
Základem modelu trakčního pohonu lokomotivy je model trakčního pohonu pro jedno hnací dvojkolí, který je v totožném provedení použit i pro modelování pohonu zbývajících 3 hnacích dvojkolí, přičemž jednotlivé modely jsou vzájemně propojeny v návaznosti na skutečné mechanické vazby existující v celé lokomotivě. Na Obr. 29 je znázorněn model trakčního pohonu pro jedno hnací dvojkolí elektrické lokomotivy řady HXD2 s tím, že na obrázku je rovněž znázorněn i výpočet posuvné rychlosti v_6 celého dílu lokomotivy, která slouží jednak pro výpočet vozidlového odporu dílu lokomotivy, a jednak slouží pro další výpočty u ostatních hnacích dvojkolí daného dílu lokomotivy.

Výchozím prvkem modelu je trakční motor, který má v modelu u všech hnacích dvojkolí nastavenou výchozí konstantní hodnotu hnacího krouticího momentu $M_{TM} = 6$ kNm (tato hodnota odpovídá reálným jmenovitým hodnotám momentů trakčních motorů (asynchronní motory) instalovaných na elektrické lokomotivě řady HXD2). Tato konstantní hodnota však může být v rámci účinkování protiskluzové ochrany hnacího dvojkolí (lokomotivy) snižována tak, aby byl vznikající skluz hnacího dvojkolí co nejdříve eliminován a aby bylo obnoveno adhezní valení kol hnacího dvojkolí po kolejnicích.

Krouticí moment z hnacího motoru je prostřednictvím ozubeného převodu, tvořeným pastorkem (umístěným na společné hřídeli rotoru trakčního motoru) a velkým ozubeným kolem (nalisovaným na nápravě hnacího dvojkolí), přenášen na nápravy hnacích dvojkolí a tím i na obě kola dvojkolí. Na kolech hnacího dvojkolí se hnací moment projeví ve formě tečných sil, které vyvolávají stejně velké reakce působící z kolejnic na kola, způsobující vlastní (posuvný) pohyb hnacího dvojkolí (celé lokomotivy). V této souvislosti je nutné zmínit,

že zejména rotory trakčních motorů (včetně pastorků umístěných na společné rotorové hřídeli) představují v podstatě setrvačníky, jejichž účinek je tím větší, čím je větší převod pastorku (s počtem zubů z_1) a velkého ozubeného kola (s počtem zubů z_2) daný vzájemným poměrem (převodem) $i = z_2/z_1$. Má-li rotor moment setrvačnosti J_r , potom jeho hodnota redukováná (přepočítaná) na osu hnacího dvojkolí J_{rd} je dána vztahem:

$$J_{rd} = J_r \cdot i^2 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2 ; \text{kg} \cdot \text{m}^2, -] \quad (26)$$



Obr. 29 Model trakčního pohonu pro jedno hnací dvojkolí lokomotivy

V modelu je tato redukce provedena vždy pro každý rotor trakčního motoru a každý pastorek. Působením hnacího momentu na kola hnacího dvojkolí se dvojkolí otáčí určitou úhlovou rychlostí, která se na obvodu kol projevuje příslušnou obvodovou rychlostí. Tato rychlost je v modelu porovnávána s posuvnou rychlostí v_6 celé lokomotivy a vzniklý rozdíl

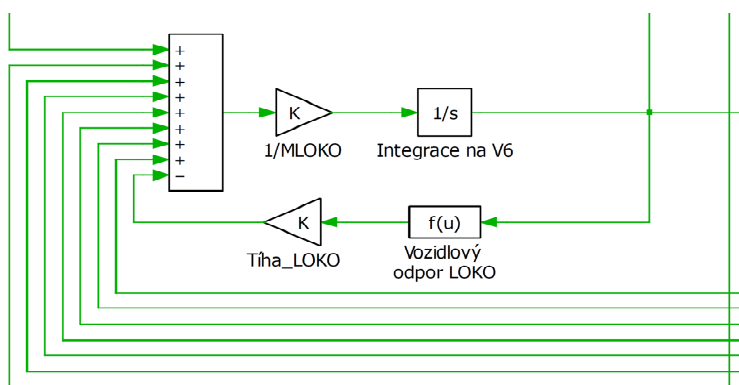
obou rychlostí představuje skluzovou rychlost w . Ze skluzové rychlosti w je přes tzv. rychlostní skluzovou charakteristiku ($\mu = f(w)$) (viz Obr. 28) zjištěna hodnota součinitele adheze μ , kterou je následně vynásobena hodnota normálové síly N působící na 1 každé kolo hnacího dvojkolí a tím dostáváme hodnotu tečné tažné síly T jednoho kola vznikající mezi kolem a kolejnicí (Obr. 31) [14]. Součet všech těchto tečných sil potom představuje celkovou tečnou (tažnou) sílu jednoho dílu lokomotivy na obvodu všech hnacích kol.

6.3.2 Model zjišťování posuvné rychlosti lokomotivy

Kromě tažných sil lokomotivy je v modelu zohledněn i jízdní odpor lokomotivy, který je v modelu reprezentován pouze hodnotou vozidlového odporu lokomotivy. Traťové odpory (odpor ze stoupání, z oblouku, z tunelu atd.) nejsou v modelu uvažovány, tj. model lokomotivy předpokládá pohyb lokomotivy po přímé trati s nulovým sklonem a bez tunelů. Pro zjištění hodnoty vozidlového odporu celého jednoho dílu lokomotivy je v modelu použit součinitel vozidlového odporu o_L , jehož koeficienty jsou zjišťovány měřením během tzv. výběhových zkoušek kolejových vozidel. Vozidlový odpor lokomotivy O_L (viz též rovnice (22)) je vypočítán vynásobením součinitele vozidlového odporu o_L a hodnotou tíhy lokomotivy G_L (v našem případě hodnotou tíhy jednoho dílu lokomotivy, tj. $G_L = M_L \cdot g$). Pro lokomotivu je použit empirický vztah platící pro elektrické podvozkové lokomotivy s individuálním pohonem dvojkolí [27]:

$$o_L = 3,7 + 0,012 \cdot V + 0,000418 \cdot V^2 \quad (27)$$

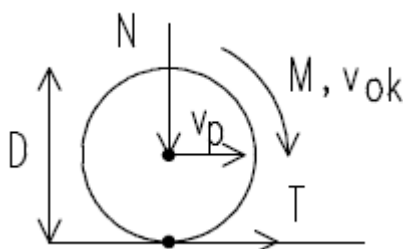
- kde V - okamžitá rychlost hnacího vozidla (lokomotivy) [$\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$],
 o_L - součinitel vozidlového odporu hnacího vozidla (lokomotivy) [$\text{N} \cdot \text{kN}^{-1}$].



Obr. 30 Detail modelu zjišťování posuvné rychlosti lokomotivy

Hodnota celkové tažné síly jednoho dílu lokomotivy (snížená o vozidlový odpor jednoho dílu lokomotivy) je v dalším kroku podělena celkovou hmotností lokomotivy, čímž obdržíme zrychlení posuvného pohybu lokomotivy a následnou integrací potom i výslednou hodnotu rychlosti posuvného pohybu lokomotivy v_6 (Obr. 30), která je porovnávána s obvodovou rychlostí v_{ok} každého hnacího dvojkolí k určení jejich skluzové rychlosti w (viz již zmínka výše

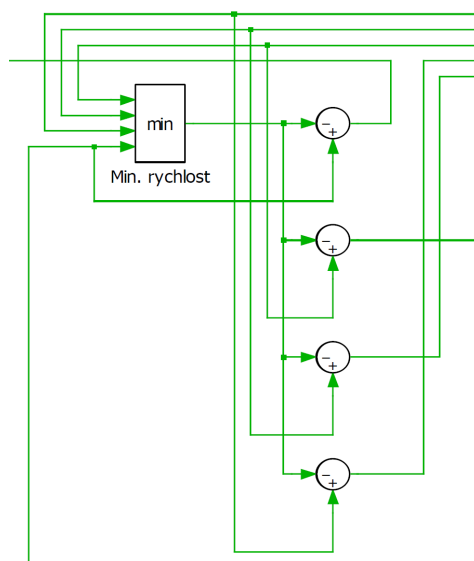
v textu). Na následujícím Obr. 31 jsou pro ilustraci znázorněny základní veličiny působící na kolo hnacího dvojkolí. Tímto je principiálně popsáno základní uspořádání modelu trakčního pohonu lokomotivy. V dalším textu bude popsán princip modelu protiskluzové ochrany.



Obr. 31 Základní veličiny působící na kolo hnacího dvojkolí

6.3.3 Model protiskluzové ochrany lokomotivy

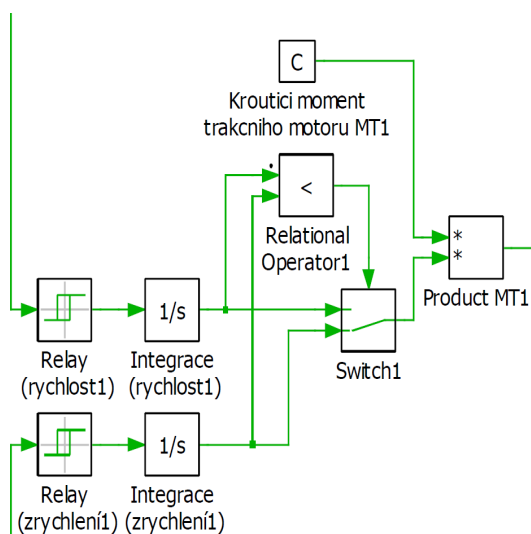
Protiskluzová ochrana má za úkol zabránit prokluzu hnacích dvojkolí, a pokud již skluz nastane, tak jej co nejdříve a co nejefektivněji eliminovat, aby bylo obnoveno adhezní valení kol hnacích dvojkolí po kolejnicích. Ze všech možných řešení jsou v našem modelu použity zároveň 2 strategie – porovnávání úhlových rychlostí a okamžité hodnoty úhlového zrychlení.



Obr. 32 Detail modelu zjišťující hodnotu vztažné rychlosti (vztažného dvojkolí lokomotivy)

Strategie porovnávání úhlových rychlostí (Obr. 32) spočívá v tom, že se provádí porovnání okamžité úhlové rychlosti ω_i daného kola (hnacího dvojkolí) s tzv. vztažným kolem (vztažným hnacím dvojkolím) otáčejícím se vztažnou úhlovou rychlostí ω_j . Za vztažné hnací dvojkolí se v režimu tzv. jízdy silou považuje hnací dvojkolí otáčející se (v rámci všech hnacích dvojkolí lokomotivy) nejnižší úhlovou rychlostí $\omega_j = \omega_{min}$ (v případě režimu brzdění by se naopak za vztažné hnací dvojkolí považovalo dvojkolí otáčející se nejvyšší úhlovou rychlostí ω_{max}). V rámci této strategie se nejprve provede porovnání úhlových rychlostí přímo

řízených kol všech hnacích dvojkolí lokomotivy a z nich se určí hodnota nejnižší úhlové rychlosti (nejpomaleji otáčejícího se hnacího dvojkolí). Následně se provede porovnání úhlových rychlostí přímo řízených kol všech hnacích dvojkolí lokomotivy s takto zjištěnou nejnižší hodnotou úhlové rychlosti (Obr. 32) a vzniklé rozdíly úhlových rychlostí jsou pro příslušná hnací dvojkolí dále zpracovány a upraveny v několika krocích do konečné podoby signálu, který jako vstupní signál vstupující do vlastního modelu trakčního pohonu provádí v konečném důsledku úpravu hodnoty hnacího krouticího momentu trakčního motoru (nastaveného na výchozí konstantní hodnotu 6 kNm) tak, aby se výsledná hodnota hnacího momentu přizpůsobila okamžitým skluzovým poměrům daného kola (kol) lokomotivy. Vstupní signál se v integračním bloku ještě předtím upravuje na výslednou hodnotu, která moment trakčního motoru koriguje (omezuje) v rozmezí od 0,05 do 1,00 požadované (výchozí konstantní) hodnoty hnacího momentu trakčního motoru (Obr. 33). Problém vztažné rychlosti je u vozidel se všemi nápravami hnanými zásadní. Pokud lze předpokládat, že alespoň jedno z hnacích dvojkolí neklouže a zároveň, že žádné hnací dvojkolí se nepohybuje smykem, tj. s nulovou úhlovou rychlostí, lze za vztažnou úhlovou rychlost považovat úhlovou rychlost nejnižší, popř. v režimu brzdění nejvyšší (ze všech hnacích dvojkolí lokomotivy), přičemž její výběr se ovšem musí provádět průběžně. Pokud ale nastane situace, při které prokluzují všechna hnací dvojkolí současně (tzv. synchronní skluz), tj. nebude vyhodnocen žádný rozdíl v úhlových rychlostech jednotlivých hnacích dvojkolí, potom takto nastavená protiskluzová ochrana lokomotivy zřejmě selže a nedojde k žádné eliminaci skluzu hnacích dvojkolí. Takový případ může nastat při velmi špatných adhezních poměrech a nevhodné technice jízdy (rychlé zvyšování požadované tažné síly). Pro zajištění správné činnosti i v tomto případě lze použít např. nezávislý zdroj rychlosti, který měří přímo rychlost proti zemi, anebo fiktivní, neklouzající dvojkolí, tzv. „pseudodvojkolí“ (zpravidla). Nicméně ani tato opatření nejsou absolutní zárukou zjištění skluzu hnacích dvojkolí. Aby se zvýšila záruka, že skluz dvojkolí bude zjištěn, lze tuto strategii doplnit ještě další strategií porovnávající zrychlení.



Obr. 33 Detail modelu znázorňující princip protiskluzové ochrany lokomotivy

Strategie okamžité hodnoty úhlového zrychlení (Obr. 33) je založena na tom, že se vyhodnocuje okamžité úhlové zrychlení přímo řízeného kola příslušného hnacího dvojkolí. Přesáhne-li zjištěná velikost okamžitého úhlového zrychlení přednastavenou hodnotu, následuje v návaznosti na zjištěný rozdíl v úhlových rychlostech regulační zásah spočívající ve snížení požadované (výchozí konstantní) hodnoty hnacího momentu trakčního motoru.

V modelu jsou použity obě výše zmíněné strategie s tím, že model jednak vyhodnocuje rozdíly úhlových rychlostí, a jednak okamžitou velikost úhlového zrychlení (Obr. 33). Bloky označené ve schématu modelu jako "Relay" (rychlosti a zrychlení) působí jako hysterezní regulátory, přičemž základním předpokladem pro jejich správnou činnost je nastavení hodnot spodní a horní hranice (tj. hodnoty rozdílu rychlostí, resp. hodnoty zrychlení). Nastavení hodnot horní hranice představuje vyvolání reakce regulátoru, naopak nastavení hodnot spodní hranice představuje okamžik ukončení zásahu regulátoru. Výstupní signál z bloku "Relay" může mít zápornou hodnotu v případě, že došlo k překročení nastavené hodnoty horní hranice hysterezního pásma bloku „Relay“ (tj. regulátor je uveden do činnosti), anebo naopak kladnou hodnotu, pokud došlo k překročení nastavené hodnoty spodní hranice hysterezního pásma (tj. regulátor je vyřazen z činnosti). Výstupní signál je zaveden do bloku Integrátoru a integrací je vytvořena klesající (resp. stoupající) rampa s rozdílnou strmostí, přičemž hodnoty strmostí vyplývají z nastavených parametrů v bloku „Relay“. Velikost rampy je omezena nastavenými parametry v bloku Integrátoru, které v našem modelu mají nastavenou minimální hodnotu 0,05 a maximální hodnotu 1,00. Výstupní signály z obou bloků Integrátorů (reagujících na rozdíly úhlových rychlostí a na velikost úhlového zrychlení) jsou vzájemně porovnávány. Přes Přepínač je vybrána nižší hodnota z obou signálů a ta následně tvoří konečný výstupní signál protiskluzové ochrany, jenž reguluje velikost výchozí konstantní hodnoty hnacího momentu daného trakčního motoru.

Prostřednictvím nastavených hodnot parametrů v blocích „Relay“ lze ovlivňovat strmost (rychlost) reakce (zásahu) a zotavení obou typů regulátorů. Pro simulaci protiskluzové ochrany trakčního pohonu jsou v modelu uplatněny regulátory s přednastavenými parametry, jejichž hodnoty jsou uvedeny v Tab. 3.

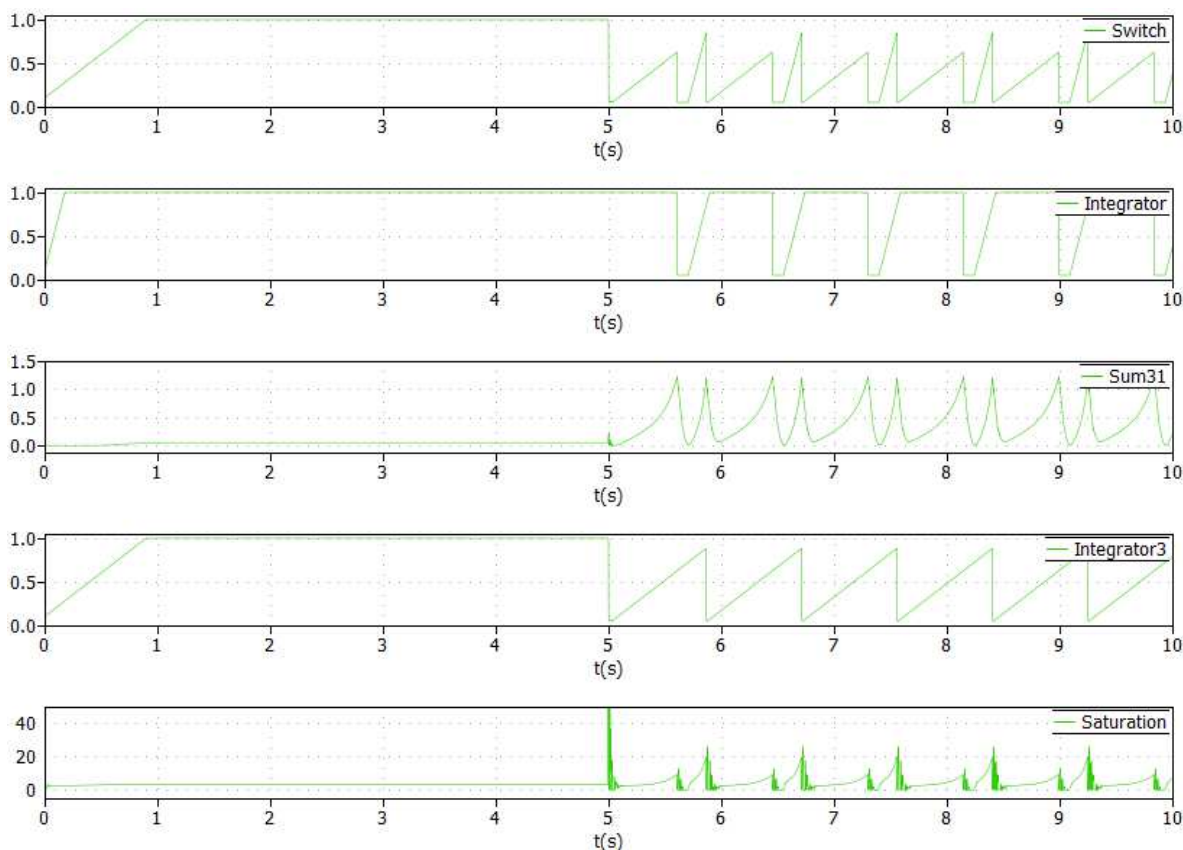
	Regulátor pro rozdíl úhlových rychlostí		Regulátor pro úhlové zrychlení	
	1. hnací dvojkolí	2. - 4. hnací dvojkolí	1. hnací dvojkolí	2. - 4. hnací dvojkolí
Horní hranice pásma	1,20	1,20	20	50
Spodní hranice pásma	0,01	0,90	5	25
Strmost klesání	-300	-200	-450	-450
Strmost nárůstu	5	100	1	1

Tab. 3 Nastavené hodnoty parametrů regulátorů protiskluzové ochrany

6.4 Výsledky simulace s modelem protiskluzové ochrany

Aby bylo možné ověřit jednak funkčnost celého modelu tračního pohonu jednoho dílu lokomotivy, a jednak funkčnost protiskluzové ochrany lokomotivy použité v modelu, byla provedena simulace rozjezdu lokomotivy s použitím vytvořeného modelu jednoho dílu lokomotivy s tím, že pro simulaci byl zvolen časový úsek o délce trvání 10 s. V rámci simulace rozjezdu lokomotivy byly použity obě skluzové rychlostní charakteristiky (Obr. 28), přičemž v první polovině celkového časového úseku trvání simulace (tj. v úseku trvajícím 5 s) je z důvodu zajištění pohnutí lokomotivy z místa a dosažení alespoň určité minimální rychlosti posuvného pohybu lokomotivy použita skluzová rychlostní charakteristika platná pro suchou a čistou kolej ($\mu_{max} = 0,4$). Po uplynutí doby 5 s je provedeno přepnutí na skluzovou rychlostní charakteristiku platnou pro vlhkou (znečištěnou) kolej ($\mu_{max} = 0,15$), která je použita ve druhé polovině doby simulace a která již umožňuje simulovat nestabilní chod lokomotivy (tj. prokluzu hnacích kol). Nastavené parametry trakčního pohonu však neumožňovaly realizovat situaci, při níž by se v rámci protiskluzové ochrany kromě strategie porovnávání úhlových rychlostí plně uplatnila i strategie okamžité hodnoty úhlového zrychlení, byla proto záměrně zvýšena hodnota hnacího momentu trakčního motoru prvního hnacího dvojkolí o více než dvojnásobek (na 13 kNm). Simulací rozjezdu lokomotivy pomocí vytvořeného modelu trakčního pohonu s protiskluzovou ochranou se tedy podařilo nejen ověřit funkčnost modelu, ale i správnou činnost protiskluzové ochrany, a to jednak při větším rozdílu úhlových rychlostí jednotlivých hnacích dvojkolí, a jednak i při vyšší okamžité hodnotě úhlového zrychlení, což se uplatní zejména při tzv. **synchronním skluzu**.

Na následujícím Obr. 34 jsou znázorněny průběhy významných parametrů v rámci protiskluzové ochrany elektrické lokomotivy. První průběh (označený Switch) představuje vlastní reakci protiskluzové ochrany, druhý průběh (označený Integrator) představuje výstupní signál pro omezení hnacího momentu trakčního motoru vytvořený na základě vstupního signálu vzniklého z okamžitého rozdílu úhlové rychlosti daného hnacího dvojkolí vůči úhlové rychlosti vztažného hnacího dvojkolí, třetí průběh (označený Sum31) znázorňuje okamžitý rozdíl úhlové rychlosti daného hnacího dvojkolí vůči úhlové rychlosti vztažného hnacího dvojkolí, čtvrtý průběh (označený Integrator3) představuje výstupní signál pro omezení hnacího momentu trakčního motoru vytvořený na základě vstupního signálu vzniklého z okamžité hodnoty úhlového zrychlení daného hnacího dvojkolí a pátý průběh (označený Saturation) znázorňuje průběh okamžité hodnoty úhlového zrychlení daného hnacího dvojkolí. Ze všech pěti průběhů vyplývá, že v první polovině z celkového časového úseku simulace nedochází k žádným nestabilitám ve styku kol s kolejnicí (k prokluzům), které by vyžadovaly zaúčinkování použité protiskluzové ochrany, což lze odůvodnit jízdou lokomotivy po skluzové rychlostní charakteristice platné pro suchou a čistou kolej, s níž lze předpokládat rozjezd elektrické lokomotivy bez nějakých dalších omezujících zásahů.

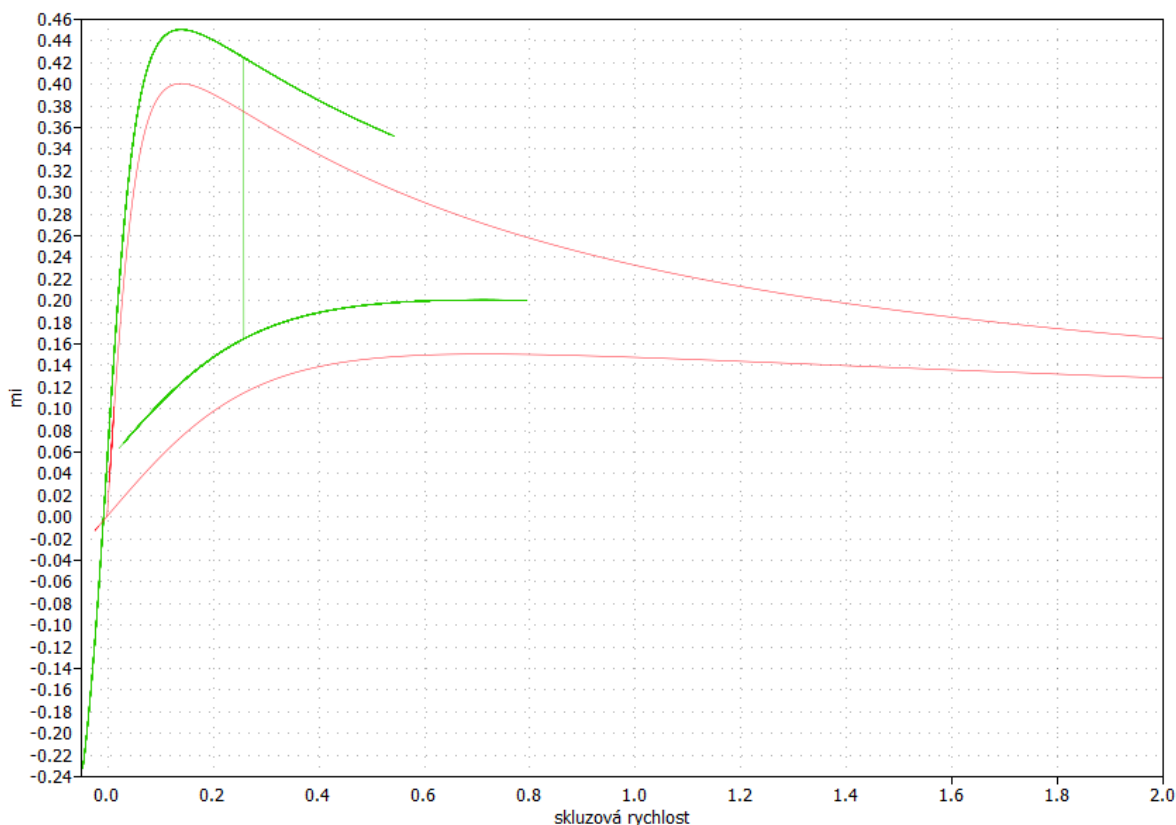


Obr. 34 Průběhy základních veličin v rámci protiskluzové ochrany lokomotivy

Rozjezd lokomotivy se tedy uskutečňuje hnacím momentem v plné výši (bez omezení), přičemž nedochází k téměř žádným rozdílům v úhlových rychlostech jednotlivých hnacích dvojkolí, a též úhlové zrychlení daného hnacího dvojkolí se udržuje ve správných mezích.

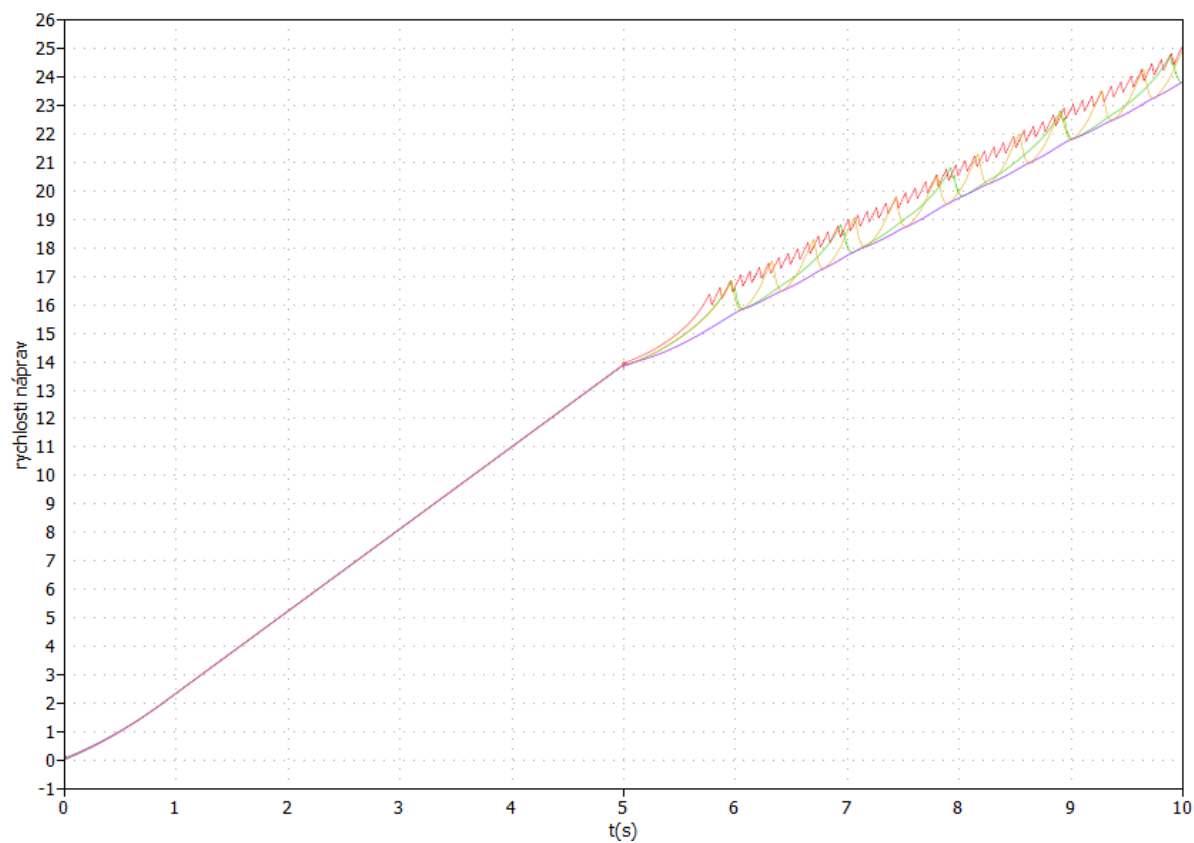
Podstatně jiná situace nastává v okamžiku přechodu (změny) na skluzovou rychlostní charakteristiku platnou pro vlhkou (znečištěnou) kolej, která je dobře zřetelná i na průbězích zobrazených na Obr. 34. Z průběhů vyplývá reakce protiskluzové ochrany při vznikajícím prokluzu, jednak zaregistrovaným díky zvětšujícimu se rozdílu úhlových rychlostí jednotlivých hnacích dvojkolí (průběh Sum31), a jednak objevujícím se špičkám okamžité hodnoty úhlového zrychlení daného hnacího dvojkolí (průběh Saturation). Z průběhů označených Integrator a Integrator3 jsou patrné rozdílné rychlosti zásahu a zotavování regulátorů. Rozdíl vyplývá z principiálního působení protiskluzové ochrany, tj. zásah ochrany reagující na okamžitou hodnotu úhlového zrychlení by měl nastat až v okamžiku, kdy zásah ochrany reagující na rozdíly v úhlových rychlostech nebyl dostatečný (tj. rychlostní část protiskluzové ochrany nezvládá potřebný zásah). Vlivem toho jsou parametry části protiskluzové ochrany reagující na okamžitou velikost úhlového zrychlení nastaveny na rychlejší reakci (razantnější snižování hnacího momentu) a pomalejší následné zotavování. V čase cca 5,5 s je na obrázku patrný zásah rychlostní části protiskluzové ochrany při současném zotavování části protiskluzové ochrany reagující na rozdíly zrychlení. Na průběhu označeném Switch je zřejmá funkce výběru minima z obou částí protiskluzové ochrany (obou větví regulátorů).

Na Obr. 35 jsou znázorněny skluzové rychlostní charakteristiky znázorňující rozjezd elektrické lokomotivy po skluzových charakteristikách v oblasti maximálních hodnot součinitele adheze μ (označené ženou barvou). Naproti tomu je v obrázku znázorněn průběh rozjezdu lokomotivy při vzniklém velkém prokluzu hnacího dvojkolí, přičemž po zaúčinkování protiskluzové ochrany dochází k postupnému potlačení vzniklého prokluzu a tím k obnovení valení kol po kolejnici (označené červenou barvou). Z obrázku vyplývá, že hodnoty vzniklého prokluzu jak na suché a čisté koleji, tak i na vlhké (znečištěné) koleji jsou při zapnutém regulátoru (označené zelenou barvou) efektivně eliminovány, protože skluzová rychlost nepřesáhne hodnotu $0,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Přesnějším nastavením parametrů obou typů regulátorů (pro rozdíl úhlových rychlostí a pro okamžitou hodnotu zrychlení) by bylo možné docílit ještě další snížení této dosažené hodnoty. Vertikální odstup obou průběhů skluzových rychlostních charakteristik (charakteristika označená zelenou barvou je posunuta výše ve směru osy y) je proveden úmyslně z důvodů lepší názornosti a větší přehlednosti obou průběhů, které by se bez provedení odstupů v části charakteristik vzájemně překrývaly.

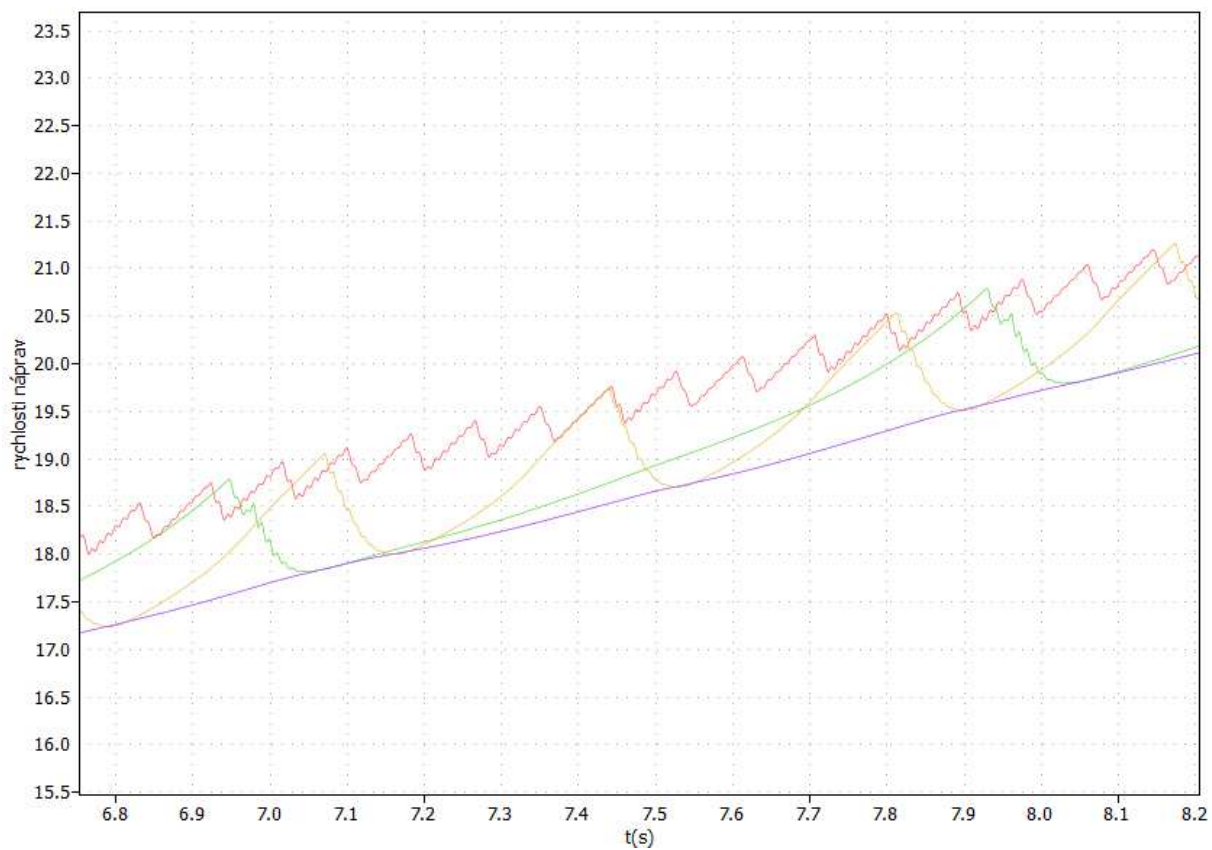


Obr. 35 Skluzové charakteristiky při správné funkci protiskluzové ochrany lokomotivy

Na Obr. 36 je znázorněn průběh úhlových rychlostí jednotlivých hnacích dvojkolí. V první polovině časového úseku simulace je zřetelné, že vlivem rozjezdu elektrické lokomotivy po skluzové rychlostní charakteristice platné pro suchou a čistou kolej nedochází k žádným nestabilitám ve styku kol s kolejnici, které by mohly mít za následek prokluz hnacích dvojkolí.



Obr. 36 Průběh úhlových rychlostí hnacích dvojkolí při rozjezdu lokomotivy



Obr. 37 Detail průběhů úhlových rychlostí jednotlivých hnacích dvojkolí při prokluzu

Naopak ve druhé polovině časového úseku dochází ke změně skluzové rychlostní charakteristiky platné pro vlhkou (znečištěnou) kolej. V důsledku toho dochází u některých hnacích dvojkolí k jejich prokluzu. Detailnější a přehlednější zobrazení časového výseku průběhu úhlových rychlostí jednotlivých hnacích dvojkolí je potom na Obr. 37.

Z obou obrázků (Obr. 36 a 37) je patrné, že hnací dvojkolí s průběhem vyznačeným modrou barvou představuje dvojkolí s nejnižší hodnotou úhlové rychlosti ze všech sledovaných hnacích dvojkolí a jedná se tedy o tzv. vztažné hnací dvojkolí. Hnací dvojkolí s průběhem vyznačeným červenou barvou představuje dvojkolí, u něhož je prokluz dvojkolí pomocí protiskluzové ochrany omezován tak, že se okamžitá úhlová rychlost pohybuje jen v určitém tolerančním pásmu. Hnací dvojkolí s průběhy vyznačenými žlutou a zelenou barvou představují dvojkolí, u nichž dochází zcela jistě k prokluzu dvojkolí a je tudíž i zřejmá činnost protiskluzové ochrany spočívající v tom, že se úhlové rychlosti po zásahu protiskluzové ochrany na okamžik sníží na hodnotu úhlové rychlosti hnacího dvojkolí s okamžitou nejnižší hodnotou úhlové rychlosti (tj. na hodnotu úhlové rychlosti vztažného hnacího dvojkolí), jež je v obrázcích označeno modrou barvou. Po obnovení adhezních schopností se úhlové rychlosti obou hnacích dvojkolí (žlutý a zelený průběh) opět zvyšují, až dojde k překročení adhezních schopností v místě styku kol s kolejnicí a dochází u obou těchto hnacích dvojkolí k prokluzu, který způsobí opětné zaúčinkování protiskluzové ochrany atd.

V návaznosti na vlastní funkci modelu protiskluzové ochrany trakčního pohonu lokomotivy lze konstatovat, že průběh znázorněný červenou barvou představuje ovlivnění nastavení hodnoty horní a spodní hranice hysterezního pásma v bloku „Relay“, průběhy znázorněné žlutou a zelenou barvou představují chování regulátorů protiskluzové ochrany pro různě nastavené hodnoty jejich stavitelných parametrů (tj. dob reakce a zotavení regulátorů).

Tímto je zjevně dokumentována nejen funkčnost vytvořeného a sestaveného celkového modelu trakčního pohonu elektrické lokomotivy, ale i především správná funkce a činnost modelu použité protiskluzové ochrany.

7 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo především vytvořit a sestavit funkční a správně pracující model protiskluzové ochrany elektrické lokomotivy. Pro vytvoření modelu trakčního pohonu bylo použito programové prostředí MATLAB (verze 2007) a v jeho rámci kompatibilní software PLECS. Model je podrobněji popsán v kapitole 6 této práce, přičemž model je vytvořen na základě konkrétních parametrů platných pro elektrickou dvoudílnou lokomotivu řady HXD2, provozovanou u Čínských železnic především při dopravě těžkých nákladních vlaků (přeprava uhlí) na střídavém napájecím systému o napětí 25 kV 50 Hz.

Model vytvořeného trakčního pohonu elektrické lokomotivy obsahuje jednak model trakčního pohonu lokomotivy (avšak v rámci určitého zjednodušení a přehlednosti celého modelu je uvažován pouze jeden její díl, tj. 4 hnací dvojkolí), jednak model zjišťování hnacího dvojkolí s nejnižší okamžitou úhlovou rychlostí, který dále slouží pro využití v protiskluzové ochraně, a jednak model vlastní protiskluzové ochrany, která pro svou činnost využívá 2 základních regulačních strategií – porovnávání úhlových rychlostí a okamžité velikosti úhlového zrychlení.

Po sestavení modelu trakčního pohonu elektrické lokomotivy (jednoho jejího dílu) byla ověřena funkčnost modelu a následně i činnost protiskluzové ochrany. Na základě zjištěných průběhů skluzových rychlostních charakteristik, výstupních průběhů veličin ovlivňujících hodnoty hnacích momentů trakčních motorů a průběhů okamžitých hodnot úhlových rychlostí jednotlivých hnacích dvojkolí jednoho dílu lokomotivy je možné konstatovat, že vytvořený model protiskluzové ochrany elektrické lokomotivy je funkční a vykazuje správnou činnost při vzniku prokluzu hnacích dvojkolí, tj. omezuje hnací moment trakčních motorů tak, aby došlo k obnovení adhezního valení kol po kolejnici.

Ověřením funkčnosti vytvořeného modelu trakčního pohonu elektrické lokomotivy a správnou činností použitého modelu protiskluzové ochrany byl splněn cíl této diplomové práce.

Model trakčního pohonu elektrické lokomotivy včetně modelu použité protiskluzové ochrany vytvořený a následně z hlediska správné činnosti ověřený v této diplomové práci může posloužit jako jeden ze základních prvků pro účely modelování v oblasti trakčních pohonů, zejména z hlediska optimalizace nastavení parametrů pohonu pro fázi rozjezdu lokomotivy, aby nedocházelo k nestabilitám (k nežádoucím prokluzům) ve styku kol s kolejnici.

8 Seznam použitých zkratek

ČD	.....	České dráhy, a. s.
DB	.....	Německé dráhy (<i>Deutsche Bahn</i>)
DKV	.....	depo kolejových vozidel – organizační složka v rámci ČD
EMC	.....	elektromagnetická kompatibilita
GTO	.....	hradlem vypínaný tyristor (<i>Gate Turn off Thyristor</i>)
IGBT	.....	bipolární tranzistor s izolovaným hradlem (<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>)
IGCT	.....	tyristor s velmi krátkou vypínací dobou (<i>Integrated Gate-Commutated Thyristor</i>)
ÖBB	.....	Rakouské spolkové dráhy (<i>Österreichische Bundesbahnen</i>)
PWM	.....	pulzně-šířková modulace (<i>Pulse Width Modulation</i>)
ss	.....	stejnoseměrný

9 Seznam obrázků

Obr. 1	Elektrická třísystémová lokomotiva ČD řady 380 (typ 109 E ŠKODA)	5
Obr. 2	Elektrická jednosystémová (3 kV ss) jednotka ČD řady 471	6
Obr. 3	Elektrická dvousystémová jednotka ČD řady 660.....	7
Obr. 4	Elektrická třísystémová jednotka s naklápěcí skříňí ČD řady 680.....	8
Obr. 5	Zjednodušené schéma zapojení trakčních obvodů hnacího vozidla s předřadnými (rozjezdovými) rezistory	12
Obr. 6	Zjednodušené schéma zapojení trakčních obvodů dvousystémového hnacího vozidla s pulzními měniči.....	13
Obr. 7	Zjednodušené schéma zapojení trakčních obvodů hnacího vozidla s transformátorem a usměrňovači	14
Obr. 8	Zjednodušené schéma zapojení trakčních obvodů hnacího vozidla s pulzními měniči	15
Obr. 9	Schéma hlavních obvodů lokomotivy DB řady 111.....	17
Obr. 10	Zjednodušené schéma zapojení trakčních obvodů třísystémového hnacího vozidla s asynchronními motory	18
Obr. 11	Zjednodušené schéma zapojení trakčních obvodů hnacího vozidla s asynchronními motory.....	18
Obr. 12	Zjednodušené schéma zapojení trakčních obvodů třísystémové lokomotivy 109 E s asynchronními motory	20
Obr. 13	Kolo valící se v rovině odchýlené od roviny koleje o úhel náběhu α	24
Obr. 14	Rychlostní skluzová charakteristika (idealizovaná a skutečně naměřená).....	27
Obr. 15	Adhezní charakteristika a třecí charakteristika	27
Obr. 16	Tendence deformací a vratnost skluzové charakteristiky.....	28
Obr. 17	Základní typy skupinového pohonu dvojkolí	30
Obr. 18	Základní typy individuálního pohonu dvojkolí	31
Obr. 19	Příklad následků dlouhotrvajícího skluzu hnacího vozidla	37
Obr. 20	Otáčková čidla Lenord-Bauer	39
Obr. 21	Základní principy zapojení protiskluzových ochran hnacích vozidel.....	40
Obr. 22	Charakteristický průběh výstupního signálu z otáčkového čidla	42
Obr. 23	Principiální schéma mechanického modelu trakčního pohonu.....	43
Obr. 24	Typový náčrt dvoudílné elektrické lokomotivy řady HXD2	46
Obr. 25	Dvoudílná elektrická lokomotiva Čínských železnic řady HXD2.....	46
Obr. 26	Trakční charakteristika dvoudílné elektrické lokomotivy řady HXD2	47
Obr. 27	Principiální schéma zapojení trakčních obvodů lokomotivy řady HXD2.....	48
Obr. 28	Rychlostní skluzová charakteristika použitá v modelu trakčního pohonu.....	49
Obr. 29	Model trakčního pohonu pro jedno hnací dvojkolí lokomotivy	51

Obr. 30	Detail modelu zjišťování posuvné rychlosti lokomotivy	52
Obr. 31	Základní veličiny působící na kolo hnacího dvojkolí	53
Obr. 32	Detail modelu zjišťující hodnotu vztažné rychlosti (vztažného dvojkolí lokomotivy)	53
Obr. 33	Detail modelu znázorňující princip protiskluzové ochrany lokomotivy	54
Obr. 34	Průběhy základních veličin v rámci protiskluzové ochrany lokomotivy	57
Obr. 35	Skluzové charakteristiky při správné funkci protiskluzové ochrany lokomotivy	58
Obr. 36	Průběh úhlových rychlostí hnacích dvojkolí při rozjezdu lokomotivy	59
Obr. 37	Detail průběhů úhlových rychlostí jednotlivých hnacích dvojkolí při prokluzu	59

10 Seznam tabulek

Tab. 1 Typická provedení elektrické části elektrických hnacích vozidel	22
Tab. 2 Základní technické parametry trakčního pohonu lokomotivy řady HXD2.....	48
Tab. 3 Nastavené hodnoty parametrů regulátorů protiskluzové ochrany.....	55

11 Seznam použité literatury

- [1] Vyhláška Ministerstva dopravy č. 173/1995 Sb., ve znění pozdějších předpisů, kterou se vydává dopravní řád drah
- [2] KOLÁŘ, J.: Teoretické základy konstrukce kolejových vozidel, učební text pro studenty FS ČVUT, 1. vydání, Česká technika, Praha, 2009, ISBN 978-80-01-04262-5
- [3] JANSA, F.: Vozidla elektrické trakce, 1. vydání, NADAS, Praha, 1983
- [4] DANZER, J.: Elektrická trakce 1 – Přehled problematiky, učební text v elektronické podobě pro potřeby studentů FEL ZČU Plzeň, verze ze dne 04.11.2008, Plzeň, 2008
- [5] JANSA, F.: Elektrická trakcia I, 1. vydání, ALFA, Bratislava, 1976
- [6] GREGORA, S., NOVÁK, J.: Modernizace trakčních pohonů vozidel elektrické trakce, Vědeckotechnický sborník ČD č. 17, Praha, 2004
- [7] DANZER, J.: Elektrická trakce 3 – Plynulá regulace cize buzeného motoru, učební text v elektronické podobě pro potřeby studentů FEL ZČU Plzeň, verze ze dne 04.11.2008, Plzeň, 2008
- [8] ČEŘOVSKÝ, Z.: Prezentace k předmětu Elektrické pohony 2, Lokomotiva ŠKODA 109E - ČD 380, FEL ČVUT, Praha, 2009
- [9] JAVŮREK, J.: Regulace moderních elektrických pohonů, GRADA Publishing, 1. vydání, Praha, 2003, ISBN 80-247-0507-9
- [10] ČÁP, J., FREIBAUER, L., HLAVŇA, V.: Teorie vozidel, učební text pro studenty F-SET VŠDS Žilina, 1. vydání, VŠDS, Žilina, 1991
- [11] IZER, J.: Kolejové vozy - dodatek, učební text pro studenty F-SET VŠDS Žilina, 1. vydání, ALFA, Bratislava, 1988
- [12] ČÁP, J., POLÁCH, O.: Výzkum adheze a výsledky dosažené na VŠDS, Železniční technika č. 6/1983, str. 273 – 277, NADAS, Praha, 1983
- [13] ČÁP, J.: Další možnosti zvyšování adhezních schopností kolejových vozidel, Vědeckotechnický sborník ČD č. 2, str. 55 – 73, Praha, 1996,
- [14] ČÁP, J.: Početně stanovené adhezní charakteristiky, Železniční technika č. 5/1986, str. 229 – 232, NADAS, Praha, 1986
- [15] MÜLLER, J. a kol.: Výpočtové metody v kolejových vozidlech, učební text pro studenty F-SET VŠDS Žilina, 1. vydání, ALFA, Bratislava, 1982
- [16] ŠVEJNOCH, V. a kol.: Teorie kolejových vozidel, učební text pro studenty FS ČVUT, 1. vydání, Ediční středisko ČVUT, Praha, 1991, ISBN 80-01-00622-0
- [17] ČÁP, J.: Adhezní omezení pro trakci i brzdění, příspěvek na XV. mezinárodní konferenci "Současné problémy v kolejových vozidlech", str. 27 - 35, Česká Třebová, 09/2001
- [18] ČÁP, J.: Otázka pevné a volné vazby kola s kolejnicí, Železniční technika č. 4/1991, str. 176 – 178, NADAS, Praha, 1991

- [19] ČÁP, J.: Strmost vzestupné větve adhezní charakteristiky, Železniční technika č. 1/1988, str. 12 – 16, NADAS, Praha, 1988
- [20] DANZER, J.: Elektrická trakce 7 – Adheze, učební text v elektronické podobě pro potřeby studentů FEL ZČU Plzeň, verze ze dne 05.08.2013, Plzeň, 2013
- [21] LATA, M.: Konstrukce kolejových vozidel II, učební text pro studenty DFJP UP Pardubice, 1. vydání, UP Pardubice, 2004, ISBN 80-7194-696-6
- [22] ŠÍBA, J.: Kolejová vozidla II – pojezd, učební text pro studenty FS ČVUT, 2. vydání, Ediční středisko ČVUT, Praha, 1991, ISBN 80-01-00615-8
- [23] BASLAR, J., MRKVIČKA, J.: Trakční vozidla závislá I, 1. vydání, NADAS, Praha, 1982
- [24] DANZER, J.: Adheze a protiskluzová zařízení, Elektrotechnický obzor č. 10/1986, str. 598 – 607, SNTL, Praha, 1986
- [25] ŠIROKÝ, J.: Mechanika v dopravě I – kolejová vozidla, učební text v elektronické podobě pro potřeby studentů VŠB-TU Ostrava, 1. vydání, Ostrava, 2003
- [26] PAVELKA, J., BAUER, J., LEV, M.: Research Report JC2016-0042a, FEL CVUT, Praha, 2016
- [27] JANSÁ, F.: Dynamika a energetika elektrické trakce, 1. vydání, NADAS, Praha, 1980
- [28] ZELENKA, J., MICHÁLEK, T., KOHOUT, M.: Mechanika dopravy, učební text pro studenty DFJP UP Pardubice, 1. vydání, UP Pardubice, 2013, ISBN 978-80-7395-739-1
- [29] ČÁP, J.: Některé otázky vztahu třecí a adhezní charakteristiky ve styku kola s kolejnicí, Železniční technika č. 2/1988, str. 66 – 69, NADAS, Praha, 1988