

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Internetová podpora pro výuku elektrické trakce**

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**

**Fakulta elektrotechnická**

**Akademický rok: 2014/2015**

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Luboš TALAFOUS**  
Osobní číslo: **E13N0134P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Dopravní elektroinženýrství a autoelektronika**  
Název tématu: **Internetová podpora pro výuku el. trakce**  
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

### **Z á s a d y   p r o   v y p r a c o v á n í :**

Diplomová práce je zaměřena na rozšíření internetového výukového software o problematiku elektrické trakce. Diplomová práce bude obsahovat:

1. Zpracování základní problematiky z oboru el. trakce (rozdělení vozidel, trakční napájecí systémy, varianty realizace hlavního pohonu).
2. Trakční charakteristiky, trakční mechanika, vizualizace problematiky pro několik variant pohonu (vozidlo se stupňovou a s plynulou regulací). Vizualizace bude např. demonstrovat pohyb pracovního bodu po trakční charakteristice během rozjezdu, jízdy, a brzdy.
3. Problematiku brzd (popis základních principů). Vizualizace demonstrující problematiku cílového brzdění.
4. Pomocné pohony na vozidlech.
5. Problematika pevných trakčních zařízení pro vozidla závislé trakce.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

**Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Pittermann, Ph.D.**  
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2014**  
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na rozšíření internetového výukového portálu EDUCON o problematiku elektrické trakce. Hlavním cílem této práce je možnost předání základních informací čtenáři prostřednictvím webového rozhraní. Obsah diplomové práce je rozdělen do pěti hlavních kapitol, zahrnujících: Základní rozdělení elektrické trakce, trakční mechaniku a trakční charakteristiky vozidel, problematiku brzd a cílového brzdění, pomocné pohony použité na vozidlech a pevná trakční zařízení pro vozidla závislé elektrické trakce. Výukový portál navíc obsahuje vytvořené vizualizace, umožňující čtenáři postupný přechod mezi jednotlivými fázemi.

## **Klíčová slova**

Elektrická trakce, železnice, tramvaj, trolejbus, metro, lokomotiva, rozchod kolejí, napájení, vysoké napětí, pohon, asynchronní motor, synchronní motor, stejnosměrný motor, elektromotor, komutátor, pomocný pohon, stejnosměrný proud, střídavý proud, trakční charakteristika, cílové brzdění.

## **Abstract**

**Title:** Internet support for education of electric traction.

Submitted diploma thesis is focused on broadening the EDUCON online educational site with the Electric Traction issue. The main objective of the thesis is the possibility of conveying the basic information to the reader through the web interface. The content of the diploma thesis is divided into five main parts covering: Primary division of the electric traction, the traction mechanics and traction characteristics of vehicles, the brakes issue and target braking, the auxiliary propulsion for vehicles and the stationary traction equipment for vehicles with dependent electric traction. The educational site is further enhanced with the created visualizations, giving the reader a possibility of gradual passage among the individual phases.

## **Key words**

Electric traction, railway, tram, trolleybus, underground, locomotive, track gauge, supply, high voltage, drive, asynchronous engine, synchronous engine, DC engine, electric motor, commutator, auxiliary drive, DC, AC, traction characteristic, target braking.

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....  
podpis

V Plzni dne 10.5.2015

Luboš Talafous

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Pittermannovi Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

## Obsah

<b>OBSAH .....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ .....</b>	<b>10</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK .....</b>	<b>11</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>12</b>
<b>1 ELEKTRICKÁ TRAKCE.....</b>	<b>13</b>
1.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ VOZIDEL ELEKTRICKÉ TRAKCE .....	13
1.1.1 Trolejbus .....	15
1.1.2 Tramvaj .....	16
1.1.3 Podzemní dráha (Metro) .....	17
1.1.4 Železnice .....	18
1.2 TRAKČNÍ NAPÁJECÍ SYSTÉM .....	20
1.2.1 Historie a oblasti použití trakčního napájecího systému .....	20
1.2.2 Stejnoseměrný trakční napájecí systém nízkého napětí .....	22
1.2.3 Třífázový trakční napájecí systém .....	23
1.2.4 Stejnoseměrný trakční napájecí systém vysokého napětí .....	23
1.2.5 Jednofázový trakční napájecí systém sníženého kmitočtu .....	24
1.2.6 Jednofázový trakční napájecí systém průmyslového kmitočtu.....	24
1.3 VARIANTY REALIZACE HLAVNÍHO POHONU .....	25
1.3.1 Stejnoseměrný sériový trakční motor .....	26
1.3.2 Stejnoseměrný cize buzený trakční motor .....	27
1.3.3 Asynchronní trakční motor .....	28
1.3.4 Synchronní trakční motor .....	29
<b>2 TRAKČNÍ MECHANIKA, TRAKČNÍ CHARAKTERISTIKY .....</b>	<b>30</b>
2.1 TRAKČNÍ MECHANIKA .....	30
2.2 TRAKČNÍ CHARAKTERISTIKY .....	33
2.2.1 Trakční charakteristika – Stupňová regulace.....	33
2.2.2 Trakční charakteristika – Plynulá regulace.....	37
<b>3 PROBLEMATIKA BRZD .....</b>	<b>40</b>
3.1 ROZDĚLENÍ BRZD.....	41
3.1.1 Elektrodynamické brzdy .....	42
3.1.2 Třecí (Mechanické) brzdy.....	45
3.2 PNEUMATICKÉ BRZDY KOLEJOVÝCH VOZIDEL .....	48
3.2.1 Přímochinná brzda .....	49
3.2.2 Samočinná brzda.....	50
3.3 CÍLOVÉ BRZDĚNÍ .....	52
<b>4 POMOCNÉ POHONY NA VOZIDLE ELEKTRICKÉ TRAKCE .....</b>	<b>55</b>
4.1 VENTILÁTORY .....	56
4.2 KOMPRESORY .....	58
4.3 ČERPADLA.....	58



<b>5</b>	<b>PEVNÁ TRAKČNÍ ZAŘÍZENÍ PRO VOZIDLA ZÁVISLÉ TRAKCE.....</b>	<b>60</b>
5.1	TRAKČNÍ MĚNÍRNY (TM) .....	61
5.2	TRAKČNÍ TRANSFORMOVNY (TT).....	63
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>65</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>67</b>
	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>1</b>

## Seznam symbolů

<b>symbol</b>	<b>veličina</b>	<b>jednotka</b>
B	magnetická indukce	[T]
C	kapacita kondenzátoru	[F]
f	kmitočet	[Hz]
F	síla	[N]
I	elektrický proud	[A]
I <sub>a</sub>	elektrický proud kotvy	[A]
I <sub>b</sub>	elektrický proud buzení	[A]
l	délka	[m]
L	indukčnost	[H]
m	hmotnost	[t]
M	moment	[N.m]
N	normálová síla	[N]
p	tlak	[Pa]
P	činný elektrický výkon	[W]
S	plocha, průřez	[m <sup>2</sup> ]
t	čas	[s]
U	elektrické napětí	[V]
U <sub>b</sub>	budící napětí	[V]
U <sub>i</sub>	indukované elektrické napětí	[V]
U <sub>ss</sub>	stejnoseměrné elektrické napětí	[V <sub>ss</sub> ]
v	rychlost	[m.s <sup>-1</sup> ]
V	rychlost	[km.h <sup>-1</sup> ]
μ	koeficient adheze	[-]

## Seznam použitých zkratk

<b>zkratka</b>	<b>pojem</b>
AC	Střídavý proud
ASM	Asynchronní motor
ATO	Automatické řízení vlaku
AVV	Automatické vedení vlaku
CRV	Centrální regulátor vozidla
CSS	Kaskádové styly
ČD	České dráhy
DC	Stejnoseměrný proud
EDB	Elektrodynamická brzda
EDUCON	Výukový portál
GTO	Vypínatelný tyristor
HVAC	Topení, větrání a klimatizace
IGBT	Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem
MHD	Městská hromadná doprava
MIB	Magnetický informační bod
RCB	Regulátor cílového brzdění
ST	Spínací stanice
TGV	Vysokorychlostní vlak
TM	Trakční měnič
TNS	Trakční napájecí stanice
TT	Trakční transformovna

## Úvod

Závěrečná práce mého magisterského studia je zaměřena na rozšíření internetového výukového portálu EDUCON o modul elektrické trakce. Pro přístup do výukového portálu EDUCON slouží webová adresa: [www.educon.zcu.cz](http://www.educon.zcu.cz). Tento portál je vytvořen za účelem poskytnutí čtenáři základní informace z elektrotechnického oboru. V dnešní době obsahuje výukové moduly, týkající se elektrických pohonů, výkonové elektroniky a testovacího systému EDUTEST. Mým přínosem je obohacení výukového materiálu o problematiku úzce spojenou s elektrickou trakcí. Z důvodu fyzické dostupnosti a zachování integrity obsahu výukového portálu (modulu elektrické trakce) jsem zvolil variantu, u které se obsah výukového portálu shoduje s obsahem diplomové práce.

Pro vznik této diplomové práce byla nutná základní znalost tvorby webových stránek s použitím kaskádových stylů CSS, znalost vektorového grafického editoru pro tvorbu schémat a obrázků a především znalost z oboru elektrické trakce.

Diplomová práce obsahuje 5 základních kapitol o celkovém počtu 74 stran. Prostřednictvím příloh je umožněn náhled na vytvořené vizualizace, umístěné ve výukovém portálu.

Úvodní obrázek – Náhled na portál EDUCON

# 1 Elektrická trakce

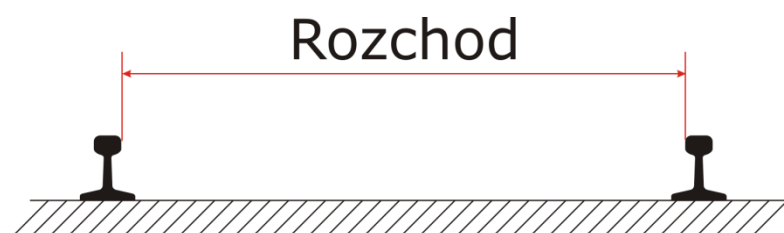
Pojem „trakce“ pochází z latinského původu a je odvozen od slova *trahere* (*trahi, tractum*) - tahat, vozit či táhnout. Elektrickou trakci lze definovat jako pohon hnacího vozidla prostřednictvím elektromotoru, který je nazýván trakčním motorem. Do skupiny vozidel, využívající elektrickou trakci, lze zařadit všechna hnací vozidla s elektrickým pohonem hnacích kol. Pro pohon soupravy je využito přeměny elektrické energie (z vnějšího zdroje či baterie) na energii kinetickou a naopak. V elektrické trakci se často využívá výrazu *elektrická vozba*. Pod tímto názvem si lze představit mechanizovanou pozemní dopravu, u které je elektrická energie přivedena přímo ke dráze. [1]

## 1.1 Základní rozdělení vozidel elektrické trakce

V oboru elektrické trakce lze vozidla rozdělit hned do několika skupin. První z nich je rozdělení hnacích vozidel podle přivedení energie na vozidla:

- Závislá trakce – vozidla jsou závislá na dodávce elektrické energie (zdrojem se rozumí trakční vedení, ze kterého je trakční proud přiváděn do vozidla)
- Nezávislá a polo-závislá trakce – vozidlo není závislé na rozvodu energie, zdroj je umístěn přímo na vozidle. Jako zdroj energie může být použit vznětový motor (dieselelektrická vozba), turbína (parní či plynová), akumulátor nebo setrvačnick. Zásoba energie je tak silně omezená na zásobnících energie. [1], [2]

Druhá skupina rozděluje vozidla elektrické trakce dle jízdní dráhy. Setkáváme se s dráhami nekonvenčními (visuté kolejové, lanové, sedlové nebo vedené na vzduchovém či magnetickém polštáři) a konvenčními (kolejové dráhy). Dále bych se zabíral problematikou konvenčních drah. U nich se jedná o rozchod kolejí, který se ve světě zcela odlišuje. Měření se provádí pomocí kolejové rozchodky a to ve výšce 14 mm pod temenem kolejnice mezi vnitřními hranami kolejí. Rozchod kolejí je patrný z *Obrázku 1*.

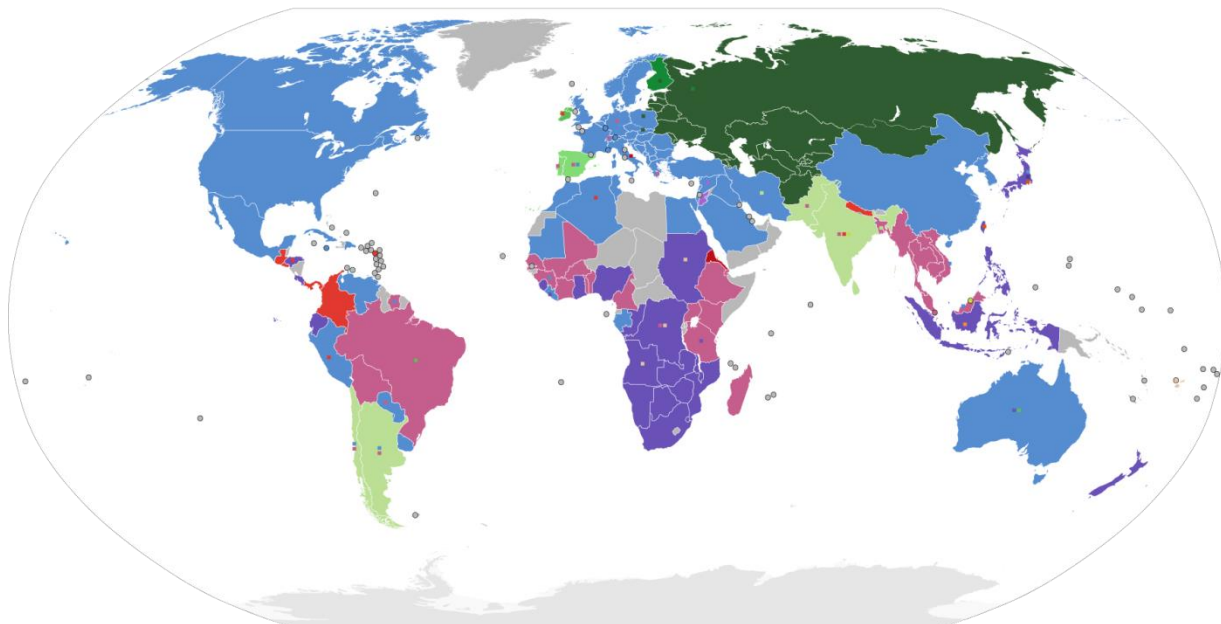


Obrázek 1 - Rozchod kolejí [3]

Rozchod kolejí se rozděluje do následujících kategorií:

- **Rozchod průmyslových drah** - Rozsah vzdáleností od 241 mm (Polsko, Švýcarsko-Luzern) do 610 mm (úzkokolejná dráha ve Walesu, Indii, vojenské a průmyslové dráhy ve světě)
- **Úzký rozchod** (úzkokolejná dráha - železniční, tramvajová, průmyslová či důlní dráha). Rozsah vzdáleností od 650 mm (Maroko) do 1219 mm (Skotsko-Glasgowská podzemní dráha). Následující uvedené hodnoty patří mezi známé úzké rozchody.
  - 750 mm – Německo, Argentina (vojenské a průmyslové dráhy)
  - 760 mm – tzv. bosenský rozchod (Bosna, Indie, Kuba, Slovensko, Česká republika - Jindřichohradecké místní dráhy)
  - 900 mm – Německá úzkokolejná dráha, v ČR dříve důlní dráha Sokolov
  - 1000 mm – tzv. metrový rozchod - úzkorozchodné a tramvajové dráhy (Německo, Švýcarsko, Španělsko, v ČR tramvajová dráha mezi Libercem a Jabloncem nad Nisou, tramvaj v Bratislavě)
  - 1067 mm – Tzv. kapský rozchod-jih Afriky, Japonsko, Austrálie, Nový Zéland
  - 1106 mm – Koněspřežná dráha (Gmunden – Linec - České Budějovice)
- **Normální rozchod** – prvotně označený pouze rozchod 1435 mm, zaujímající 60 % z celkového počtu železnic. Tento rozchod je standardizován pro dráhy v České republice. Důsledkem špatného měření se do této skupiny zařazují i následující rozchody kolejí.
  - 1372 mm – Skotsko, Japonsko (část železničních drah, metro, tramvajová dráha)
  - **1435 mm** – střední a západní Evropa, Čína, severní Afrika a Amerika, Japonsko (vysokorychlostní tratě Shinkansen)
  - 1440 mm, 1445 mm (Itálie – tramvaj v Římě, Miláně a Turíně), 1450 mm, 1458 mm (Německo – tramvaj v Lipsku)
- **Široký rozchod** – Převážně používaný v Rusku. Rozsah vzdáleností od 1520 mm do 2134 mm.
  - 1520 mm – tzv. ruský široký rozchod (Mongolsko, Afghánistán)
  - 1524 mm – Finsko
  - 1664 mm – Portugalsko
  - 1668 mm – Portugalsko, Španělsko

Na *Obrázku 2* lze vidět základní grafické rozdělení rozchodů kolejí skrze celý svět. Normální rozchod (1435 mm) je označen světle modrou barvou. Zelené zbarvení prezentuje široký rozchod. Červenou a fialovou barvou jsou zvýrazněny úzké rozchody.

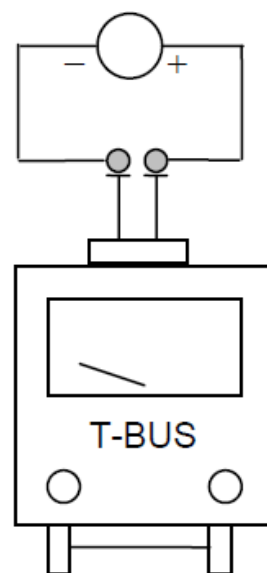


*Obrázek 2 - Grafické zobrazení rozchodu kolejí skrze svět [3]*

Třetí skupina rozděluje trakční vozidla dle jejich základního použití. Jedná se tedy o vozidla městské hromadné dopravy MHD - tramvaj, trolejbus, podzemní dráhu (Metro) a velkou skupinu tvořenou železnicí. [1], [3]

### 1.1.1 Trolejbus

Začátek progresu trolejbusové dopravy se datuje k přelomu 19. a 20. století. Tento dopravní prostředek, sloužící k přepravě osob, je tvořen trolejbusovými dráhami a patří k nedílné součásti již u každého středně velkého města. Díky trolejbusové dopravě dochází ke sjednocení dopravy s příměstskými částmi měst či okolními vesnicemi. Používané dopravní vozidlo – Trolejbus – nese charakteristické rysy silničního vozidla (autobusu) s vozidlem drážním. Vzhled i rozměr bývá stejný jako u klasického dieselového autobusu, pohybujícího se taktéž po pneumatikách. Rozdíl nastává v použité pohonné jednotce. Trolejbus primárně používá k pohonu elektromotor, jako sekundární pohon může být použit dieselový agregát. Ten může sloužit pro přejezd nezatrolejovaného území nebo k objetí předmětu vyskytujícího se v cestě. V tomto případě se jedná o takzvaný „duobus“.

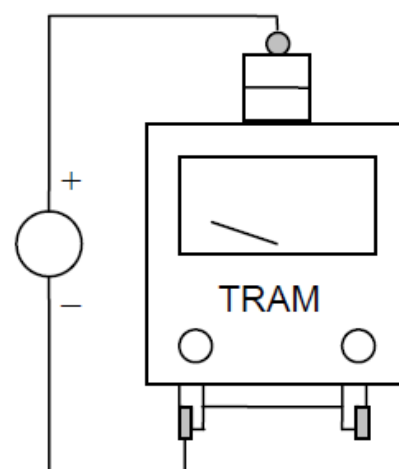


*Obrázek 3 - Napájení trolejbusu [2]*

Vozidlo je napájeno skrze dva tyčové sběrače z dvoupólového trolejového vedení (jeden vodič – kladný pól, druhý vodič – záporný pól) o hodnotě 600 V (v některých městech 750 V) stejnosměrných. Zjednodušený princip napájení je možné vidět na *Obrázku 3*. Díky moderním prvkům elektrické výzbroje zde nastává možnost rekuperace brzděné energie (elektrodynamické brzdění), kdy se při brzdění stává z elektromotoru dynamo a vyrobenou elektrickou energii umožňuje vracet zpět do sítě. Další výhody oproti klasickým autobusům můžeme najít v ekologičnosti a jízdních vlastnostech. Asi největší nevýhodou trolejbusové dopravy je nutná dostupnost trolejového vedení. [2], [4]

### 1.1.2 Tramvaj

Tramvajová doprava patří do skupiny nazvané lehká kolejová vozidla. Předchůdcem dnešní tramvajové dopravy byly takzvané *Koněspřežné dráhy*, kde byly vozy taženy koňmi. Takovýto systém pohonu byl následně nahrazen parou, ale ani tento pohon nezapadal do koncepce městského prostředí z důvodu nadměrného znečištění ovzduší. První elektrické tramvajové dráhy vznikly v roce 1881 v Berlíně. U nás se elektrické tramvaje poprvé objevily v Praze roku 1891, kde se jednalo o pokusnou tramvajovou linku. Rozdíl oproti železnici tkví v lehčím provedení konstrukce, kratších vzdálenostech zastávek, provozování pouze osobní přepravy a



*Obrázek 4 - Princip napájení tramvaje [2]*

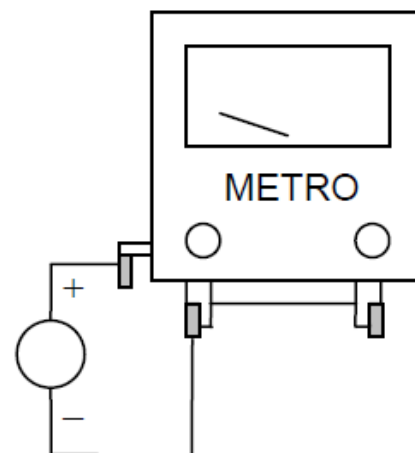
především je tramvajová dráha vedena přímo v městských částech. Tramvajové vozidlo získává elektrickou energii z trolejového vedení o hodnotě 600 V (v některých městech 750 V) stejnosměrných pomocí pantografového sběrače. Zjednodušený princip přívodu elektrické energie je patrný z *Obrázku 4*. Trolejové vedení vytváří kladný pól a koleje, po kterých se tramvajové vozidlo pohybuje, představují záporný pól, kterým se trakční proud uzavírá zpět ke zdroji. Jsou i výjimky, kde je polarita opačná (například Ostrava). V dnešní době se vyskytuje více modifikací zapojení tramvajové soupravy. Vozidlo, konstruované jako samostatná souprava či více zapojených tramvajových vozů za sebou společně řízených řidičem. Provoz tramvaje může být řešen jako jednosměrný nebo obousměrný (u druhé varianty dochází ke snížení míst pro sezení pasažérů). Dnešní doba nabízí konstrukci nízkopodlažních tramvajů, kde oproti klasickým tramvajím je elektrická výzbroj uložena jen na střeše vozidla. Novinkou systému pohonu je řešení pomocí kolových trakčních motorů, které jsou upevněny přímo na kolech tramvaje, na rozdíl od starších typů, u kterých



byly uloženy pod podlahou. Nevýhodou tramvajové dopravy je velká náročnost na výstavbu tratě v městské zástavbě. [2], [6]

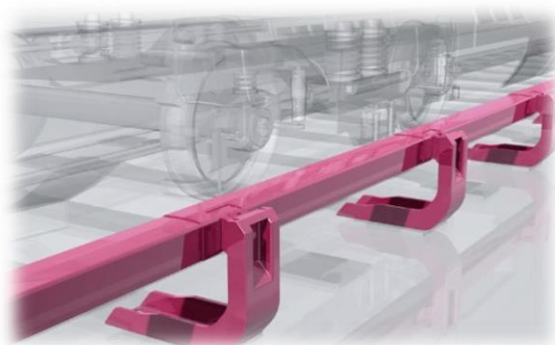
### 1.1.3 Podzemní dráha (Metro)

Podzemní dráha, častěji známá pod názvem Metro, se jako první železniční stavba objevila již v roce 1863 v Londýně. Název „Metro“ je odvozen od slova *Metropolitan* – hlavní město, které se začalo jako první používat v Paříži roku 1900. V počátcích se pro pohon používala pára, až později se přešlo na elektrickou trakci. Souprava metra se pohybuje po kolejích a je napájena pomocí sběrače ze třetí kolejnice, umístěného z boku soupravy. V české republice je podzemní dráha napájena z napětí 750 V stejnosměrných. Koleje, po kterých se



Obrázek 5 - Princip napájení metra [2]

souprava pohybuje, představují záporný pól. Třetí, takzvaná přívodní kolejnice (Obrázek 6), je uložena izolovaně a vytváří kladný pól vedení. Elektrická výzbroj je převážně uložena pod podlahou. Na Obrázku 5 je možné vidět principiální napájení soupravy metra. V české republice se s metrem můžeme setkat pouze v hlavním městě Praze. Pražské metro, složené ze tří linek (Trasa A, B, C), vytváří hlavní páteřní síť MHD v Praze. Dohromady čítá 57 stanic pokrývajících délku 60 km. Nejrozsáhlejším systémem podzemní dráhy je americké město New York s celkovým počtem 26 linek. Kromě klasických podzemních drah se také vyskytují netradiční varianty, například *Okružní dráha* ve skotském Glasgow nebo unikátní podzemní dráha v Paříži, kde se souprava pohybuje po pneumatikách a je řízena centrálním počítačem. Vozidlová souprava je vždy tvořena ucelenými celky odpovídajícími délce nástupních ploch. Bezkonkurenční výhodou podzemní dráhy je její dynamika, rychlost a přepravní kapacita. Souprava také není vystavena povětrnostním podmínkám oproti ostatním dopravním prostředkům. Nevýhoda je v nákladné výstavbě a stavbě nových tras již v zastavěných oblastech. [4], [7]



Obrázek 6 - Přívodní kolejnice [8]

#### 1.1.4 Železnice

Železnice jako taková je velmi rozmanitě odvětví dopravních prostředků prolínajících se celým svým spektrem. Železnice se významně podílela na průmyslové revoluci a změnila tak společnost, kde lokomotiva představovala vrchol strojírenské technologie. Roku 1804 postavil Richard Trevithick první funkční parní lokomotivu pro anglické ocelárny. První elektrické lokomotivy (vynálezce Werner von Siemens) se dostaly na dráhy po roce 1879. Od roku 1900 se začaly využívat také vznětové motory. Obor železnice lze rozdělit do několika následujících podskupin dle jejich výskytu a použití:

- **Městské rychlodráhy** - Jsou vozidla podobné soupravám podzemní dráhy často se pohybujících po železničních tratích. Jsou zpravidla napájena ze stejnosměrného napájecího napětí 750 V nebo 1500 V pomocí třetí přívodní kolejnice. Lze se také často setkat s napájením z klasické troleje za pomoci trolejového sběrače.
- **Předměstské jednotky** - Lze zařadit do skupiny železničních vozidel pro přechod mezi městskou hromadnou dopravou MHD a klasickou železniční osobní dopravou. Ve většině případů se jedná o ucelené vlaky složené z dílčích souprav, které jsou násobně řízené z koncových vozidel. Pro větší přepravní kapacity se jednotky vyrábí i jako dvoupodlažní. Vysokou hmotností souprav a dynamikou jízdy je vyžadováno velkých výkonů jak při jízdě, tak při brzdění. Toho se docílí velkým podílem hnaných náprav. Názvem S-Bahn (Stadtschnellbahn - městská rychlodráha) došlo ke sjednocení městských a příměstských specifických drah, známých především v Německu, Rakousku či Švýcarsku.
- **Vozidla pro regionální dopravu** - Tato vozidla slouží pro osobní dopravu na málo zatížených tratích, vzniklých na železnicích s pokročilou elektrifikací. Jedná se o období motorových vozů se spalovacími motory. Vozidla lze zařadit jako mezistupeň tramvají a předměstských jednotek. Specifické jsou svojí nízkou hmotností. Výhodou pro cestující je nízkopodlažní provedení, které usnadňuje nástup a výstup z vozidla.
- **Rychlé soupravy** - Vozidla zahrnující tuto skupinu disponují rychlostmi vyššími než 220 km/h. Vozy elektrické trakce jsou limitovány traťovými rychlostmi. Proto jsou pro rychlé soupravy budovány speciální vysokorychlostní tratě. Nic ale nebrání tomu, aby byly také využívány na klasických konvenčních tratích.

U těchto ucelených souprav se velice dbá na jejich aerodynamiku. Vysoký výkon soupravy je rozložen na většinu náprav a to umožňuje nabývat vysokých hodnot rychlostí ale i bezpečné brzdění vzhledem k adhezi.

- **Speciální a drobná vozidla** - Tato kategorie obsahuje odlišné provedení vozidel, která nelze zařadit do příslušných skupin. Patří sem například tramvaj (pro město Saarbrücken), která umožňuje provoz jak na 750 Vss (tramvajová dráha) tak i na 15 kV, 16,7 Hz (železniční trať). Dále pak vozidla hybridní (využívající nezávislého zdroje), různé vnitrozávodové či důlní průmyslové lokomotivy. Mezi drobná vozidla lze zařadit malé posunovací lokomotivy, ať už použité pro posun na nádražích nebo sloužících k posunu lodí v docích.
- **Lokomotivy** - Jedná se o typická železniční vozidla elektrické trakce, která slouží výslovně pro trakční účely. Lokomotivy jsou určeny pro posun a tažení vlakových souprav, ať už osobních či nákladních. Výkony vozidel se pohybují na velké škále možností od desítek kW až po jednotky MW. Mezi hlavní charakteristické znaky lokomotivy patří výkon, maximální rychlost, rozchod kolejí, adhezní hmotnost, uspořádání podvozku, tah či trakční napájecí systém (u elektrické lokomotivy). Podle primárního zdroje výkonu se vozidla mohou členit na:
  - Experimentální - turbínou, vrtulí
  - Parní - pístovým parním strojem a tlakovou parou
  - Diesellové - naftovým motorem (dieselektrické, dieselmechanické, dieselhydraulické)
  - Elektrické - elektromotorem

Podle účelu použití lze lokomotivy rozdělit na rychlíkové, nákladní, osobní, univerzální, posunovací, důlní a další dle jejich využití. [7], [9], [10]

V tomto odstavci jsme si shrnuli základní informace o trakčních vozidlech a jejich rozdělení. Následující kapitola se věnuje zcela zásadnímu rozdělení elektrické trakce dle trakčních proudových soustav.

## 1.2 Trakční napájecí systém

### 1.2.1 Historie a oblasti použití trakčního napájecího systému

Elektrický provoz na železnici se datuje ke sklonku 19. století, kde navazuje na elektrické tramvajové dráhy. Volba energetické soustavy se řídila vlivem vývoje elektrické vozby s ohledem na následující tři kategorie:

- Výroba a přenos elektrické energie
- Přívod elektrické energie do vozidla
- Trakční motor s regulační technikou

To mělo za následek vznik různých trakčních proudových soustav, ze kterých se většina z nich vlivem postupného zdokonalování zachovala až doposud. Trakční napájecí soustavy lze rozdělit do dvou základních typů. Jedná se o stejnosměrné a střídavé napájecí systémy.

Napájení ze zdroje stejnosměrného proudu patří mezi historicky nejstarší. S postupem času docházelo ke zvyšování napájecího napětí z důvodu nárůstu požadavků na výkon vozidel a vzdálenosti, na kterých měl být přenášen. Napětí stejnosměrných motorů bylo omezováno přítomností komutátoru, u kterého nesmělo překročit hodnotu větší než 1 500 V z důvodu nevhodného využití. U používané stejnosměrné soustavy 3 kV proto dochází k vytváření motorových skupin, ve kterých jsou vždy dva trakční motory trvale spojeny do série. Stejnosměrné soustavy jsou napájeny z trakčních měničů. Druhým typem jsou střídavé soustavy, které jsou napájeny z trakčních transformoven. Použitím vyšší hodnoty střídavého napětí lze docílit přenosu vyšších výkonů, menších proudů a ztrát na delších traťových úsecích mezi napájecími stanicemi. Vozidlo pro tento napájecí systém je vybaveno transformátorem, který bohužel zvyšuje výrazně hmotnost samotného vozidla, přesto výhodou zůstává optimální volba napětí na motoru a používání jeho hospodárné regulace.

V dnešní době dosahují tyto trakční napájecí systémy prakticky stejných úrovní jak z pohledu spolehlivosti, tak i energetické hospodárnosti. Kritériem rozlišnosti jsou především pořizovací a provozní náklady závislé na hustotě dopravy. [1], [14], [15], [16]

I přes velkou různorodost došlo k mezinárodnímu normování trakčních proudových soustav do těchto skupin:

- Stejnoseměrné proudové soustavy o jmenovitém napětí:
  - 250 V - důlní a hlubinné doly
  - 600 V - pouliční dráhy (tramvaj, trolejbus)
  - 750 V - městské rychlé a podzemní dráhy
  - 1 500 V - průmyslové a hlavní dráhy
  - **3 000 V** - hlavní dráhy
  
- Střídavé proudové soustavy o jmenovitém napětí:
  - 10 kV (16,7 Hz) - dráhy úzkého rozchodu (Evropa)
  - 15 kV (16,7 Hz) - hlavní dráhy (Evropa)
  - 6,25 kV (50 Hz) - průmyslové a hlavní dráhy
  - 15, 20, **25**, 50 kV (**50Hz**, 60 Hz - Japonsko) - hlavní dráhy
  - 11 kV (25 Hz) - dráhy v USA (postupné nahrazení 25/50 kV 60 Hz)

Následující *Tabulka 1* obsahuje přípustné odchylky od jmenovitých hodnot napětí trakčních proudových soustav. Pro srovnání jsou vybrány hodnoty napětí, které se vyskytují na území České republiky. Jmenovité hodnoty napájecích napětí jsou vypsány ve čtvrtém sloupci.

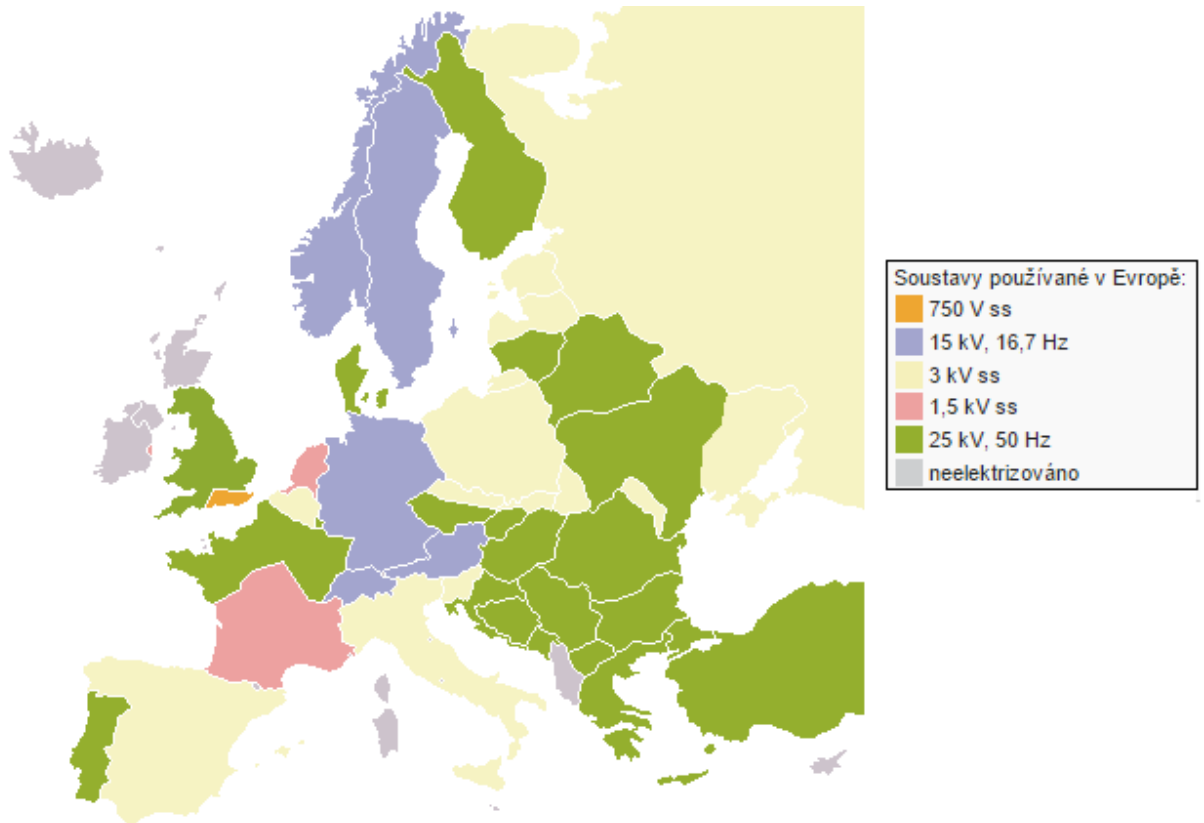
*Tabulka 1 - Jmenovitá napětí a přípustné meze jejich hodnot a trvání [11]*

Trakční proudová soustava	Nejnižší nestálé napětí	Nejnižší stálé napětí	Jmenovité napětí	Nejvyšší stálé napětí	Nejvyšší nestálé napětí
	$U_{\min 2}$ (V)	$U_{\min 1}$ (V)	$U_n$ (V)	$U_{\max 1}$ (V)	$U_{\max 2}$ (V)
Stejnoseměrná (střední hodnoty)	400 <sup>(1)</sup>	400	600	720	800 <sup>(2)</sup>
	400 <sup>(1)</sup>	500	750	900	1 000 <sup>(2)</sup>
	1 000 <sup>(1)</sup>	1 000	1 500	1 800	1 950 <sup>(2)</sup>
	2 000 <sup>(1)</sup>	2 000	3 000	3 600	3 900 <sup>(2)</sup>
Střídavá (efektivní hodnoty)	11 000 <sup>(1)</sup>	12 000	15 000	17 250	18 000 <sup>(2)</sup>
	17 500 <sup>(1)</sup>	19 000	25 000	27 500	29 000 <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Napětí v rozmezí  $U_{\min 1}$  a  $U_{\min 2}$  nesmí trvat déle než dvě minuty.

<sup>(2)</sup> Napětí v rozmezí  $U_{\max 1}$  a  $U_{\max 2}$  nesmí trvat déle než pět minut.

Obrázek 7 zobrazuje zjednodušený přehled trakčních napájecích soustav používaných v Evropě. Barevné rozdělení je popsáno po pravé straně obrázku.



Obrázek 7 - Přehled používaných trakčních soustav v Evropě [12]

V Příloze 1 je přiložena detailní mapa České republiky s jejím rozdělením dle instalovaných trakčních proudových soustav. Můžeme zde vidět konkrétní úseky napájené jak ze stejnosměrné soustavy 1,5 kV a 3 kV, tak úseky napájené střídavou soustavou 25 kV 50 Hz. Jedinou tratí napájenou napětím 15 kV 16,7 Hz na území České republiky je úsek Znojmo - Šatov.

### 1.2.2 Stejnosměrný trakční napájecí systém nízkého napětí

Prvním, vývojem použitým napájecím systémem, se stal stejnosměrný systém o nízké hladině napětí, který sloužil pro pouliční a důlní dráhy. Hodnota napětí se pohybovala v rozmezí od 250 V do 1200 V. V dnešní době se s tímto napájecím systémem můžeme setkat u tramvají a trolejbusů (600 Vss), podzemních drah (750 Vss) a rychlých městských drah (1000 Vss napájených ze třetí kolejnice). Výjimkou je S-Bahn v Hamburku, kde hodnota napájecího napětí je 1200 Vss. Tento systém se pro provoz na hlavních tratích nehodil, a to z důvodu neekonomického přenosu energie o výkonech až 10 MW na vzdálenosti v řádech sta kilometrů.

### 1.2.3 Třífázový trakční napájecí systém

Řešením, které zlepšilo výrobu a přenos elektrické energie, se stala třífázová trakční soustava vedená dvojpólovým trolejovým vedením s využitím kolejnice jako třetí fáze. Elektrifikace tratí začala probíhat na přelomu 19. a 20. století. Zapříčinila to především snaha o použití robustních indukčních motorů pro pohon železničních vozidel. Bohužel vize jednoduchosti byla vykoupena právě složitým dvou vodičovým napájením, které nevyhovovalo vysokým rychlostem vozidel, dále pak nevhodnou otáčkovou charakteristikou motorů a ztrátovou regulací rychlosti. K rozšíření třífázového systému napájení došlo především v Itálii, kde bylo pokryto přibližně 2 700 km kolejí napětím 3,4 kV 16 <sup>2</sup>/<sub>3</sub> Hz. S postupem času se tato trakční soustava zrušila (rok 1968) a přešlo se na elektrifikaci stejnosměrnou soustavou 3 000 V.

### 1.2.4 Stejnosměrný trakční napájecí systém vysokého napětí

Tato stejnosměrná soustava se vyznačuje hodnotou napětí 1 500 V nebo 3 000 V. V počátcích (rok 1903 - 1905) byla trakční soustava řešena dvojpólovým trolejovým vedením se středním vodičem v kolejnici. Důvodem byla snaha snížit namáhání izolace trakčních motorů. Složitě dvojpólové vedení se opět neujalo a bylo použito jen ojediněle. Příkladem lze uvést provedení Františka Křižíka na trati Tábor – Bechyně, která byla roku 1903 elektrifikována trojvodičem 2 x 700 V. Tato významná trať byla o 35 let později přestavěna na soustavu stejnosměrného napětí o hodnotě 1 500 V. Stejnosměrné proudové soustavy vysokého napětí se převážně rozšířily po zvládnutí techniky vysokého napětí na trakčních motorech, to znamená hodnota 1 500 V na komutátoru a izolační velikost 3 000 V. Dalším pomocným článkem byla schopnost přeměny trojfázového proudu energetické sítě v měnících na proud stejnosměrný a tím následnému použití jednopólového trolejového vedení. Vozidla, pohybující se na stejnosměrném systému, se vyznačují jednodušší konstrukcí oproti vozidlům střídavé trakce. Výhodou je také snazší rekuperace a následné využití rekuperované energie. Nevýhodou tohoto systému je omezení přenášeného výkonu limitovaného proudem, který je soustava schopna přivést na vozidlo. Stejnosměrná soustava 3 000 V se vyskytuje na územích Česka (sever), Slovenska (sever), Španělska, Itálie, Polska, Belgie, Lotyšska, Estonska, Slovinska a převážně Ruska. Grafické znázornění je patrné z *Obrázku 7*.

### 1.2.5 Jednofázový trakční napájecí systém sníženého kmitočtu

Dalším krokem rozvoje trakčních napájecích systémů byla jednofázová soustava. Střídavé napájecí napětí umožňovalo zvětšovat vzdálenosti trakčních napájecích stanic a tím i traťových úseků. Bylo tedy možné přenášet vyšší výkony na delší vzdálenosti. Nastala však komplikace v podobě trakčních motorů, které vyžadovaly rozměrné rotační měniče. U jednofázového komutátorového motoru docházelo při frekvenci 50 Hz vlivem silného jiskření k opalování lamel komutátoru a tím tedy i k rychlému opotřebení uhlíkových kartáčů. Proto bylo rozhodnuto pro snížení kmitočtu na  $1/3$ , respektive  $16\frac{2}{3}$  Hz. Tento poměr byl záměrně zvolen z důvodu realizace rotačních konvertorů na bázi šesti pólového synchronního motoru a dvoupólového synchronního alternátoru. Ukázalo se, že se se snížením kmitočtu jednalo o rozumný kompromis mezi zvětšením rozměrů transformátoru a zlepšenou komutací. Přechodem na střídavé trolejové napájení se dospělo k menšímu průřezu jednopólového vedení, snížení impedance trakčního vedení a tím i počtu napájecích stanic. Používáním tohoto napájecího systému byly železnice nuceny k zavedení vlastní výroby elektrické energie se sníženým kmitočtem a stavbu dálkových vedení. Z toho vzešly soběstačné izolované energetické základny pro trakční účely, například v Německu, Rakousku či Švýcarsku. Až s postupem času se přistoupilo na napájení trakčního vedení sníženého kmitočtu transformací z energetické sítě třífázového rozvodu. Mezi první země s touto transformací patřilo Švédsko a Norsko. Mezi jednofázové napájecí soustavy lze řadit napájecí systémy v rozmezí 5 až 11 kV - 25 Hz, vyskytující se převážně v USA a soustavy 10 až 15 kV -  $16\frac{2}{3}$  Hz používané v Evropě. Díky rozvoji polovodičové techniky a nástupem elektronických měničů se snížený kmitočet modifikoval na dnešních 16,7 Hz. Důvodem bylo především zamezení vzniku nežádoucích rezonančních jevů v rozvodné síti. Mapu Evropy s výskytem soustavy 15 kV a frekvenci 16,7 Hz lze vidět na *Obrázku 7*. V české republice se tato soustava vyskytuje pouze na trati Znojmo-Šatov (státní hranice s Rakouskem).

### 1.2.6 Jednofázový trakční napájecí systém průmyslového kmitočtu

Trakční napájecí systém průmyslového kmitočtu 50 Hz (60 Hz) byl od počátku jeho vzniku velmi uznáván a to především z hlediska hospodárnosti jak výroby, tak rozvodu elektrické energie. Tato střídavá soustava vznikala ze snahy o zjednodušení napájení trakčního vedení prostřednictvím energetické sítě průmyslového kmitočtu, prostou transformací napětí společně se štěpením fází. Cílem bylo zvětšit přenosové schopnosti vedení vlivem vyšší hladiny napětí. Za výhodu tohoto uspořádání lze považovat možnost



společné výroby a rozvodu elektrické energie pro obě skupiny (energetická síť a trakční účely), jednoduchou a hospodárnou transformaci napětí v samotných vozidlech i v napájecích stanicích. Začátky používání střídavého trakčního napájení 50 Hz se potýkaly s dlouhými (asi 50 let) nepřekonatelnými obtížemi ze strany trakčních motorů. V prvotních pokusech se pro přeměnu proudové soustavy na vozidlech využívaly rotační měniče s použitím stejnosměrných a střídavých indukčních trakčních motorů. Velký krok vpřed nastal až po technickém zvládnutí polovodičových usměrňovačů (nejprve ignitronové, později křemíkové) s amplitudovou regulací napětí na vozidlech s trakčními motory na vlnivý proud. V letech 1950 - 1960 se započalo s výrobou velmi výkonných a spolehlivých lokomotiv napájených frekvencí 50 Hz. Po této době se u většiny nově budovaných tratí dávala přednost právě střídavé trakci o průmyslovém kmitočtu 50 Hz. Některé země dokonce začaly u stávající stejnosměrné trakce s rozšířením o nové úseky, napájené právě střídavou soustavou. Tak tomu je i v České republice, kde stejnosměrný systém 3 kV byl rozšířen o střídavý systém 25 kV 50 Hz. Podrobné zobrazení je patrné z *Přílohy 1*. Výhoda střídavého systému, jako je jednoduchost ve způsobu napájení a menším průřezu trakčního vodiče (přibližně čtvrtinový) oproti stejnosměrnému systému 3 kV, je vykoupena větší složitostí a cenou elektrických lokomotiv. Negativním účinkem je také jejich zpětné působení do energetické sítě s nižším účinníkem či nežádoucí deformací proudové křivky. Velký důraz se klade i na opatření před negativními účinky střídavých magnetických polí na sdělovací a zabezpečovací obvody. Střídavý systém 25 kV 50 Hz lze nalézt na území Česka a Slovenska, Portugalska, Velké Británie, severu Francie, Dánska, Maďarska, Rumunska, Bulharska, Řecka, Turecka, Ukrajiny, Běloruska, Litvy či Finska. Detailní přehled pokrytí Evropy napájecími soustavami je patrný z *Obrázku 7*. [1], [12], [14], [15], [16]

### 1.3 Varianty realizace hlavního pohonu

Varianty realizace hlavního pohonu lze popsat podle historického vývoje trakčních motorů, používaných pro vozidla elektrické trakce. Základní rozdělení používaných trakčních motorů je z historického hlediska takovéto:

- Stejnosměrný sériový trakční motor
- Stejnosměrný cize buzený trakční motor
- Asynchronní trakční motor
- Synchronní trakční motor

Výše zmíněné trakční motory lze rozdělit podle jejich způsobu řízení. Jedná se o dvě základní skupiny: *Stupňové a plynulé řízení*. Od tohoto řízení se dále odvíjejí další parametry vozidel, například trakční charakteristiky. Typ použitého trakčního motoru se nemusí shodovat s typem napájecí soustavy. Pomocí výkonové elektroniky lze elektrickou energii transformovat do požadované formy. Například starší střídavé lokomotivy jsou vybaveny usměrňovači, ze kterých se následně napájejí stejnosměrné trakční motory. Opačným příkladem mohou být nové stejnosměrné lokomotivy vybavené střídavými asynchronními trakčními motory napájenými ze střídačů. Existuje mnoho typů a uspořádání trakčních vozidel, které si mohou být z velké části velice podobné. Pro základní popis jsou vybrána trakční vozidla konvenční železnice, tedy lokomotivy. [7], [18], [40]

### 1.3.1 Stejnosměrný sériový trakční motor

Již od počátku elektrické trakce se stal stejnosměrný sériový motor klasickým trakčním motorem, vyskytujícím se na železničních vozidlech. Díky své měkké otáčkové charakteristice se stal sériový motor jediným trakčním motorem, který mohl být bez problémů řízen stupňovou změnou napětí. Sériový motor lze napájet stejnosměrným proudem (stejnosměrná vozidla) nebo stejnosměrným zvlněným proudem (střídavá vozidla používající usměrňovač). Lokomotivy, vybavené stejnosměrnými sériovými motory, obvykle používají na stejnosměrné napájecí soustavě stupňovou odporovou regulaci a na střídavé napájecí soustavě stupňovou odbočkovou regulaci výkonu. Jen v ojedinělých případech jsou stejnosměrné sériové motory u elektrických lokomotiv napájeny z pulzních měničů. Nově tomu tak je u rekonstruované elektrické jednotky řady 560, u které je trakční motor napájen z usměrňovače se sinusovým odběrem a pulzním měničem. Sériové motory napájené z pulzních měničů se především využívaly u lehké kolejové dopravy, tzn. tramvají.

Řízení vozidla stupňovou odporovou regulací patří mezi historicky nejstarší. Proud motoru je regulován prostřednictvím postupného vyřazování rozjezdového odporníku, zapojeného v sérii s trakčními motory. Trakční motory jsou obvykle řazeny do motorových skupin a následně spojovány do sériového, sérioparalelního či paralelního spojení, které umožňuje měnit (velkou změnou) velikost napětí na svorkách trakčního motoru. Vyřazením rozjezdového odporníku se vozidlo nachází na hospodárném stupni regulace. Po dosažení hospodárného stupně a plného vyřazení rozjezdového odporníku lze ke zvýšení rychlosti využít tzv. šentování, to znamená stav hospodárné regulace, při kterém dochází k odbuzování budícího vinutí paralelně připojeným odporem. Výhodou stupňové odporové regulace je jednoduchost konstrukce. Velkou nevýhodou jsou ztráty způsobené mařením

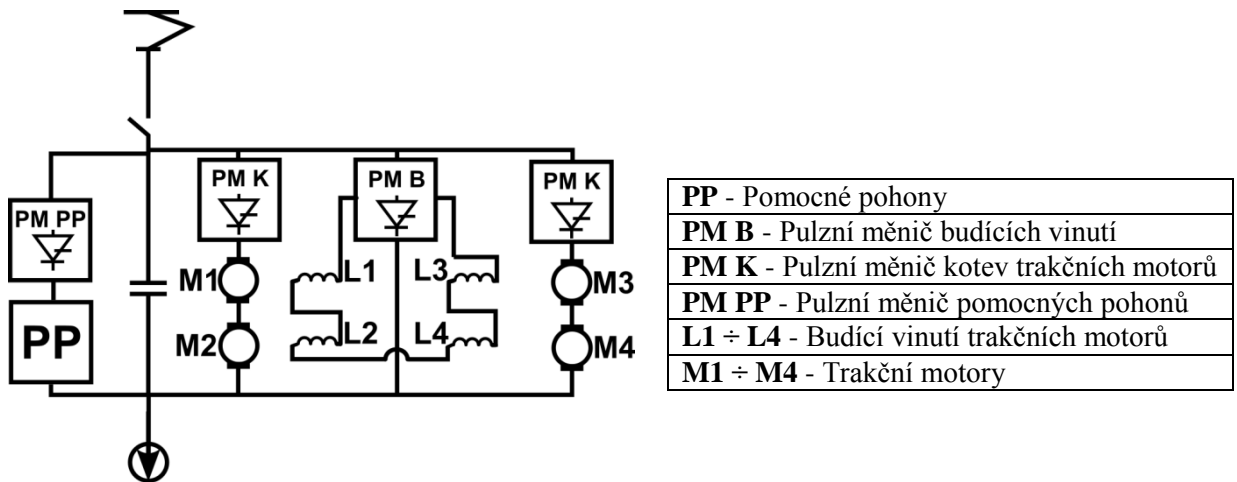
energie v odpornících. Popis trakční charakteristiky těchto vozidel je možné vidět v kapitole **2.2.1.1: Trakční charakteristika - Stupňová odporová regulace**.

Řízení výkonu stupňovou odbočkovou regulací se využívá u stejnosměrných vozidel pohybujících se na střídavém napájecím systému. Široké uplatnění těchto vozidel je úzce spojeno s rozvojem výkonové elektroniky, která umožnila výrobu a nasazení polovodičových diod do trakčních obvodů kolejových vozidel. Regulace se provádí přepínáním odboček na trakčním transformátoru, pomocí kterého dochází ke změně napětí určeného pro usměrnění a následné napájení trakčních motorů. Rozsah regulace (počet stupňů) je omezený počtem odboček transformátoru. Oproti odporové regulaci je tato regulace bezeztrátová. Nevýhodou vozidel s odbočkovou regulací je hmotnost trakčního transformátoru, která výrazně zvyšuje celkovou hmotnost vozidla. Zjednodušené schéma zapojení trakčních obvodů a trakční charakteristiku vozidla s odbočkovou regulací lze nalézt v kapitole **2.2.1.2: Trakční charakteristika - Stupňová odbočková regulace**. [7], [18], [40]

### 1.3.2 Stejnosměrný cize buzený trakční motor

Rozvoj výkonové elektroniky (výkonových polovodičových součástek od tyristorů, GTO tyristorů až po IGBT) odstartoval bouřlivý vývoj řízených usměrňovačů (pro střídavá vozidla) a pulzních měničů (pro stejnosměrná vozidla) pro účely elektrické trakce. Zavedení měničové techniky umožnilo plynulou regulaci cize buzeného stejnosměrného motoru. Pro elektrickou trakci je tento motor z hlediska regulačních vlastností ideálním zdrojem regulovaného točivého momentu. Použití cize buzeného motoru jako trakčního motoru sebou nese podmínku v použití plynule regulovaného zdroje pro napájení obvodu kotvy a buzení. Na rozdíl od stejnosměrného sériového motoru s měkkou otáčkovou charakteristikou má cize buzený motor tvrdou otáčkovou charakteristiku. Tvrdá charakteristika znamená, že malé změny napětí motoru vyvolají velké změny procházejícího proudu. Při konstantním buzení tak dochází i k velkým změnám momentu. Z tohoto důvodu je pro napájení kotvy cize buzeného motoru nutné zajistit plynulé řízení napětí. Oproti stupňové regulaci výkonu je plynulá regulace efektivnější a ekonomičtější. Nedochozí ke zbytečnému maření energie v rozjezdových odpornících. Nevýhodou se stává složitost konstrukce. Plynulá regulace cize buzeného motoru umožňuje hospodárnou a plynulou regulaci momentu prostřednictvím regulace napětí a buzení. Příkladem vozidla lze uvést lokomotivu řady 363. Regulace otáček se provádí změnou napětí kotev s následnou plynulou regulací buzení. Pulzní tyristorová regulace je plynulá, bezkontaktní a maloztrátová. Budící vinutí trakčních motorů jsou napájena ze samostatného pulzního měniče. Trakční charakteristiku plynulé regulace cize

buzeného motoru lze vidět v kapitole 2.2.2: *Trakční charakteristika – Plynulá regulace*. Zjednodušené schéma plynulé pulzní regulace vozidla s cize buzenými motory zobrazuje následující obrázek. [18], [41]



Obrázek 8 - Pulzní regulace cize buzeného motoru

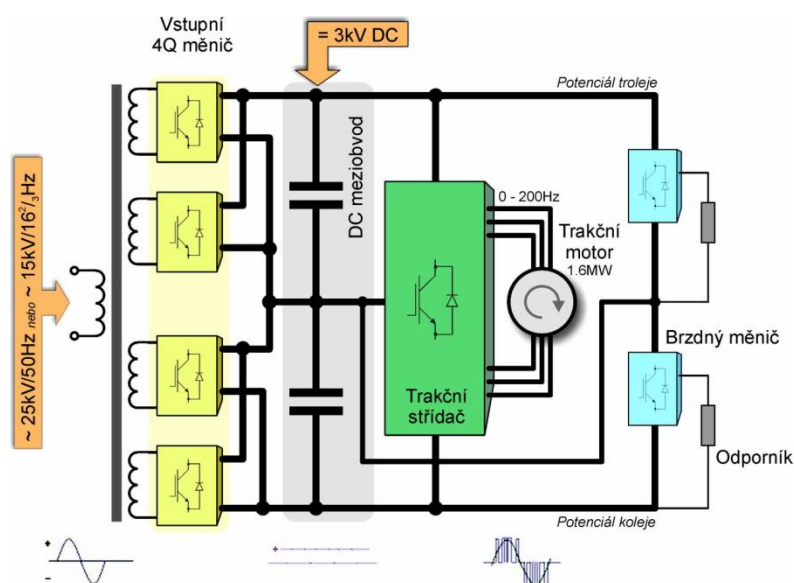
### 1.3.3 Asynchronní trakční motor

Již od objevu asynchronního motoru byla snaha tento motor využívat pro trakční účely. Především asynchronní motor s kotvou nakrátko nabízel svou jednoduchostí a odolností velice lákavou možnost využívat tyto motory pro vozidla elektrické trakce. Překážkou se v této době stala nemožnost plynulé a hospodárné regulace otáček motoru. Ta byla možná pouze se společnou změnou napájecího kmitočtu a napájecího napětí. Až vývoj polovodičových vypínatelných součástek umožňoval efektivní nasazení tohoto druhu motoru. Pro trakční účely se výhradně používají třífázové asynchronní trakční motory s kotvou nakrátko, které jsou napájeny z napěťových či proudových měničů s proměnným kmitočtem. Spolehlivá funkce pohonu je především závislá na řízení výkonového měniče trakčního motoru. Trakční asynchronní motor disponuje oproti stejnosměrným motorům vysokou spolehlivostí a to z důvodu nepřítomnosti komutátoru a uhlíkových kartáčů, které vyžadují pravidelnou údržbu. Údržba asynchronního motoru spočívá v „pouhém“ domazávání ložisek, které se vyžaduje v intervalu 500 000 až 1 000 000 km.

Asynchronní trakční motory mohou být napájeny jak z proudových, tak z napěťových měničů. V počátcích se nasazovaly proudové měniče s mezifázovou komutací, které využívaly ke svojí funkci obyčejné tyristory. Takovéto použití se osvojilo u vozidel městské hromadné dopravy z důvodu pokračování vývoje pohonu, navazujícího na stejnosměrné trakční motory. S dalším rozvojem polovodičových součástí, které umožňovaly velký rozsah výkonů, se u lokomotiv začaly používat výhradně napěťové střídače.

Asynchronní motor se stal nejrozšířenějším druhem pohonu u nově konstruovaných i rekonstruovaných vozidel. U moderních vozidel jsou trakční motory napájeny z čtyřkvadrantových napěťových měničů, umožňujících plné řízení trakčního motoru v motorickém i generátorickém režimu. [18], [30], [40]

Vozidla s asynchronními trakčními motory disponují plynulou regulací, kterou je možné vidět v kapitole 2.2.2: *Trakční charakteristika – Plynulá regulace* na Obrázku 18. Jednu z možností napájení asynchronního trakčního motoru představuje následující obrázek. Navíc Příloha 2 zobrazuje úplné blokové zapojení lokomotivy 109E.



Obrázek 9 - Schématické zapojení obvodů asynchronního trakčního motoru [31]

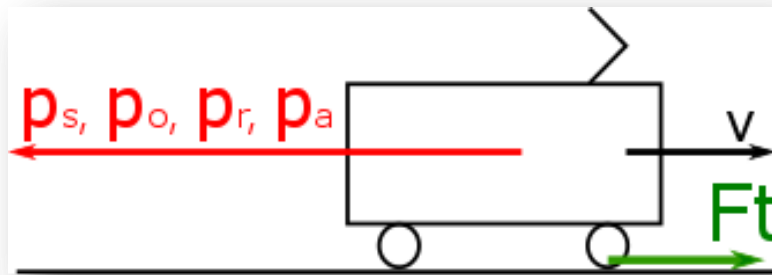
### 1.3.4 Synchronní trakční motor

Kromě stejnosměrných a asynchronních trakčních motorů se v kolejové dopravě také zřídka vyskytují i motory synchronního typu. Trakční obvod vozidla se synchronním motorem je v zásadě velmi podobný obvodům vozidel s asynchronním pohonem. Moderní vozidla jsou vybavena třífázovými trakčními motory, které mají rotor osázený permanentními magnety. Takovýto motor disponuje velmi dobrou momentovou charakteristikou a vysokou účinností. Řízení a napájení pohonu je individuální. Nevýhodou se stává nemožnost odbuzení motoru v případě poruchy trakčního obvodu. Systém pohonu se synchronními motory se především využívá u lehké kolejové dopravy, například tramvají typu 15T (s permanentními magnety) či japonských příměstských jednotek. V železniční sféře jsou těmito motory vybaveny například vozy TGV Atlantique nebo ruské lokomotivy řady EP 200. V České republice se s lokomotivami poháněnými synchronními motory nesetkáme. I přes velké výhody synchronních motorů s permanentními magnety se při vývoji lokomotiv dává přednost motorům asynchronním. [2], [30]

## 2 Trakční mechanika, trakční charakteristiky

### 2.1 Trakční mechanika

Kapitola, zabývající se trakční mechanikou popisuje základní informace nutné k pochopení pohybu trakčního vozidla po kolejové infrastruktuře. Pro uvedení kolejového vozidla do pohybu je nutné vyvinout takovou tažnou sílu, pomocí které dojde k překonání dílčích odporových sil. Působením tažné síly udělíme vozidlu zrychlení, při kterém dochází ke zvyšování rychlosti a nárůstu kinetické energie vozidla. Síly, působící proti směru pohybu kolejového vozidla, tudíž i proti tažné síle, lze zahrnout do skupiny vozidlových odporů. Pro následující výklad budeme uvažovat zjednodušující předpoklady, ve kterých budou na vozidlo působit jen síly v podélném (tažná a brzdná síla, vozidlové odpory) a svislém směru (tíhové síly). Síly jsou brány jako statické účinky bez dynamických rázů. Předpokládá se, že u kolejového vozidla nedochází k působení tažné a brzdné síly ve stejném okamžiku. Uvedený *Obrázek 10* představuje ideální vozidlo s rozložením jednotlivých sil a odporů.



*Obrázek 10 - Síly působící na pohybující se vozidlo*

V následující *Tabulce 2* jsou uvedeny jednotlivé veličiny použité pro odvození pohybové rovnice.

*Tabulka 2 - Veličiny trakční mechaniky [15]*

Název	zkratka	jednotky
Tažná síla	$F_t$	[N]
Brzdná síla	$F_b$	[N]
Hmotnost	$m$	[t]
Tíhové zrychlení	$g$	$[m/s^2]$
Zrychlení	$a$	$[m/s^2]$
Koeficient rotujících hmot	$\xi$	[-]
Měrná zrychlující síla	$p_a$	[N/t]
Měrný jízdní odpor	$p_o$	[N/kN]
Měrný jízdní odpor průjezdu obloukem	$p_r$	[N/kN]
Měrný odpor sklonu	$p_s$	[N/kN]

$$\frac{F_t}{m} = p_a \cdot \xi - (p_o + p_r + p_s) \cdot g = 0 \quad (r. 1.)$$

Rovnice *r.1* představuje základní (Newtonovu) *Pohybovou rovnici* hmotnosti vlaku sestavenou pro hmotný bod o jednotkové hmotnosti 1 tuny v těžišti vozidla. Na vozidlu lze určit působící měrné síly a odpory, které jsou popsány níže.

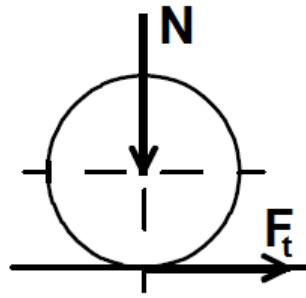
- Tažná síla  $F_t$  závislá na rychlosti hnacího vozidla
- Hmotnost vlaku  $m$
- Měrná zrychlující síla  $p_a$ , za kterou lze dosazovat vztah  $p_a = 1000 \cdot a$
- Koeficient rotujících hmot  $\xi$ , který vyjadřuje přírůstek kinetické energie vlivem rotujících hmot. Rychlost rotujících hmot je závislá na rychlosti jízdy. Udává se v rozmezí  $1,04 \div 1,3$  (typická hodnota se je 1,1).
- Měrný jízdní odpor  $p_o$ , který je určen dle druhu vozidla a rychlosti jízdy. Je způsoben třením v ložiskách ( $a_t$ ), valivým třením ( $c \cdot V$ ) a odporem vzduchu ( $b \cdot V^2$ ). Výsledná rovnice měrného jízdního odporu je dána vztahem:  $p_o = a_t + c \cdot V + b \cdot V^2$
- Měrný jízdní odpor průjezdu obloukem  $p_r$  je nepřímo závislý na poloměru oblouku  $R$  a pro jeho výpočty se používají empirické vztahy dle Rockwella určené pro:

$$\blacksquare \text{ Hlavní tratě} \quad p_r = \frac{650}{R-55} \quad (r. 2.)$$

$$\blacksquare \text{ Vedlejší tratě} \quad p_r = \frac{500}{R-30} \quad (r. 3.)$$

- Měrný odpor sklonu daného  $p_s = \pm s \text{ ‰}$ , který se mění v závislosti polohy vlaku po trati podle podélného profilu. Klesání je dáno zápornou hodnotou. Jsou dány maximální hodnoty sklonu pro hlavní tratě 25 ‰ a vedlejší tratě 40 ‰.

Do trakční mechaniky zasahuje i problematika týkající se adheze (přilnavost). Adhezi lze popsat jako schopnost přenesení tečné síly ve styku kola a kolejnice, patrné z *Obrázku 11*. Jedná se tedy o druh tření. Při účinku tažné síly dochází k narušení styčné plochy mezi kolem a kolejnicí a tím vzniká rozdíl mezi obvodovou rychlostí kola a rychlostí valení. Prokluzem je pojmenovaná situace, při níž dochází vlivem nárůstu tažné síly či zhoršení adhezních poměrů k rychle se zvětšující obvodové rychlosti poháněných kol vůči podélné rychlosti vozidla. Podobným jevem je smyk, u kterého je obvodová rychlost kola menší než podélná rychlost vozidla. Při této situaci dochází k blokování kol a následnému smýkání po kolejnicích.



Obrázek 11 – Adheze [7]

Poměrem mezi maximální tečnou silou  $F_{tmax}$  a normálním (svislým) zatížením kola  $N$ , při kterém nedojde ke skluzu či smyku kola je dán takzvaný koeficient adheze:

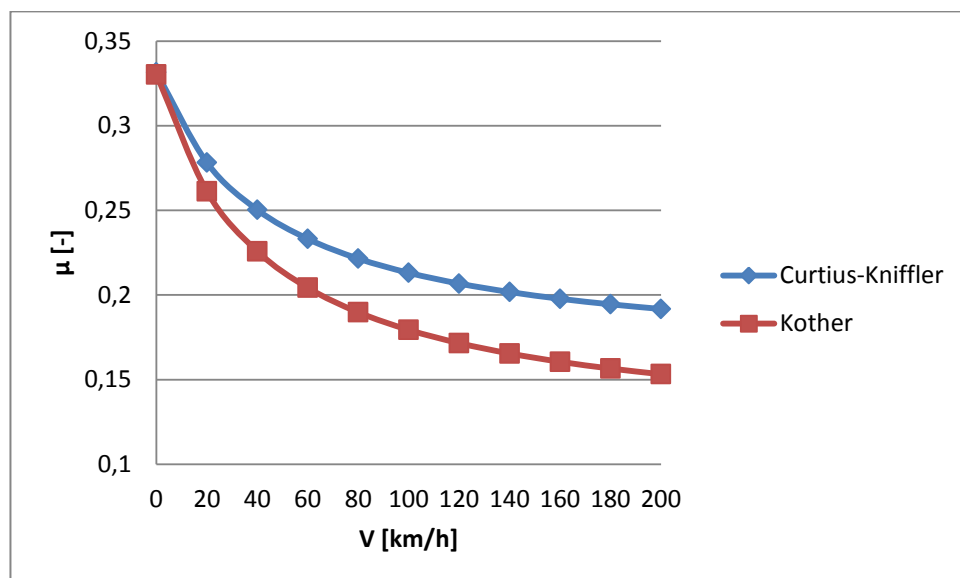
$$\mu = \frac{F_{tmax}}{N} [-] \quad (r. 4.)$$

Tento koeficient je velmi závislý na počasí a proto ho nelze jednoznačně určit. Zjišťuje se pomocí měření a je následně reprezentován regresní křivkou. V některých případech se uvádí v jednotkách %. V praktických příkladech se pro výpočet maximálních hodnot uvádějí vzorce podle:

$$\text{H. Kothera} \quad \mu_{max} = \frac{9000}{V + 42} + 116 \quad (r. 5.)$$

$$\text{Cutius – Knifflera} \quad \mu_{max} = \frac{7500}{V + 44} + 161 \quad (r. 6.)$$

Křivky koeficientu adheze jsou zobrazeny na následujícím obrázku.



Obrázek 12 - Křivky koeficientu adheze



Mezi negativní vlivy působící na adhezi lze uvést přítomnost spadaného listí či uhlého prachu, počasí, vlhkost, námraza na kolejích nebo vrstva oleje. Prostředky, kterými lze zlepšit adhezi, jsou například písek, ohřev kolejnice, čistící účinek prvního dvojkolí nebo rozložení hmotnosti na dvojkolí.

Závěrem lze shrnout, že z důvodu složitého řešení pohybové rovnice pro dílčí výkony hnacího vozidla, různých zátěží, nestálých rychlostí a sklonům tratí se dává přednost grafickému řešení vypočítaného pomocí programové podpory. [7], [15]

## 2.2 Trakční charakteristiky

Existuje několik variant, pomocí kterých lze porovnávat vozidla dle jejich hlavních provozních vlastností. Základním prostředkem jsou trakční charakteristiky. Trakční charakteristika jako taková, zobrazuje závislost tažné síly  $F_t$  (na obvodu kol) na rychlosti  $V$ . Pokud se zaměříme na průběh tažné síly, zjistíme, že není v celém svém rozsahu konstantní. Z průběhu a velikosti tažné síly se následně rozhoduje o konkrétním nasazení hnacího vozidla do provozu. Při výpočtu trakční charakteristiky se bere v potaz několik základních parametrů, například jmenovitá hodnota trolejového napětí, koeficient středně ojetých kol či další takzvané „standardní“ podmínky. Ve většině případů se do trakčních charakteristik také zahrnují závislosti maximální adhezní síly, souhrn odporů působících na vozidlo a ostatní započítávané vlivy. Trakční charakteristika jako celek obsahuje pole trakčních křivek. Pro názornost se ve většině případů (u plynulé regulace) vykreslují pouze dvě křivky, a to pro maximální a jmenovité hodnoty pracovního bodu.

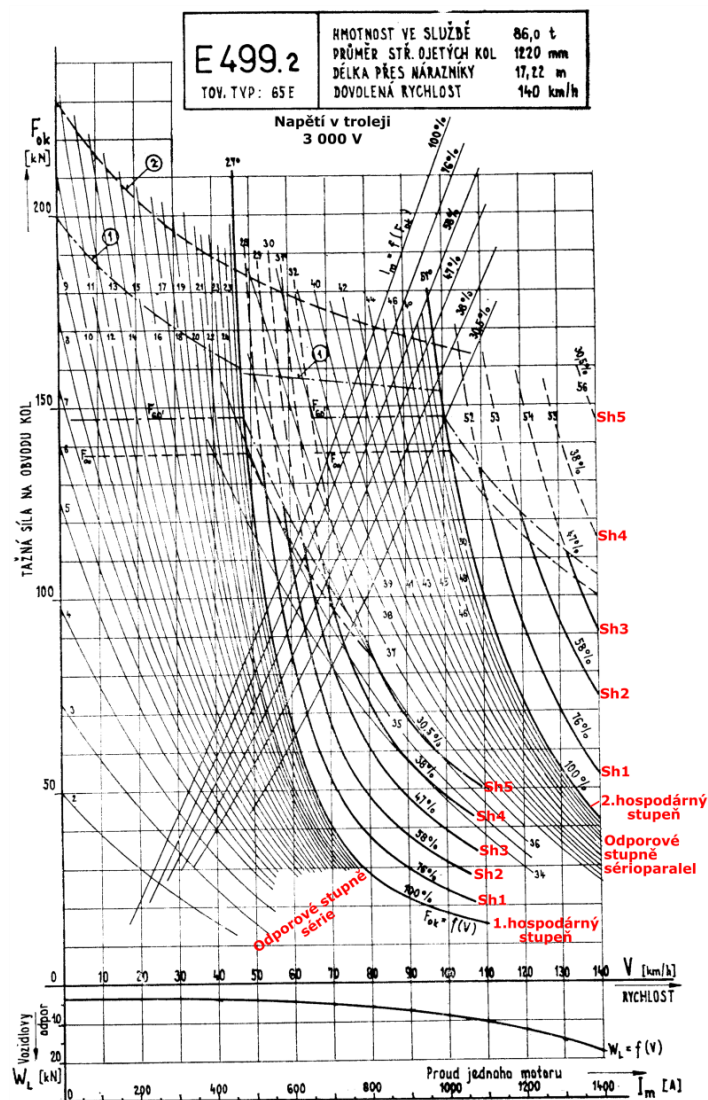
Z pohledu řízení vozidel lze trakční charakteristiky rozdělit do dvou základních skupin. Jedná se o trakční charakteristiky *Stupňové* a *Plynulé* regulace. [7], [17].

### 2.2.1 Trakční charakteristika – Stupňová regulace

Vozidla se stupňovým řízením používají pro pohon stejnosměrné sériové trakční motory. Základním prvkem pro vytvoření trakční charakteristiky je křivka sériového trakčního motoru. Ta udává konečnou podobu trakčních charakteristik. Parametrem pro sestavení soustavy trakčních křivek jsou takzvané jízdní stupně: odporový, hospodárný, šentovací a odbočky na trakčním transformátoru. Existuje několik typů uspořádání vozidel: dvou, čtyř či šesti nápravové. Pro zjednodušení se v následujícím textu budeme zabírat právě čtyřnápravovými trakčními vozidly. Z pohledu na provoz vozidel lze stupňovou regulaci rozdělit do dvou podskupin. [7], [17]

### 2.2.1.1 Trakční charakteristika - Stupňová odporová regulace

Stupňovou odporovou regulaci využívají stejnosměrná vozidla pohybující se na stejnosměrném napájecím systému. Pokud se zaměříme na čtyřnápravové vozidlo, pak každý jeho podvozek pohánějí dva stejnosměrné sériové motory zapojené do série. Trakční charakteristika těchto vozidel je složena z odporových stupňů rozjezdového odporníku, hospodárných stupňů (u čtyřnápravového vozidla jsou dva) a šentovacích stupňů (odpory paralelně připojené k vinutí hlavních pólů trakčních motorů, mají za úkol zeslabení buzení a tím zvýšení kotevního proudu a následně rychlosti). Existuje několik variant regulací výkonu, které se liší svojí funkcí. Jako příklad stupňové charakteristiky odporové regulace lze uvést vozidlo E499.2 ČSD (Škoda 65 E). Ovládání pohybu vozidla se provádí pomocí jízdních kontrolérů. V trakční charakteristice jsou vyznačeny dílčí charakteristiky odporových rozjezdových stupňů, první a druhý hospodárny stupeň i několik šentovacích stupňů (Sh1/Sh5). Tato charakteristika je přebrána jako originál. [31]



Obrázek 13 - Stupňová trakční charakteristika lokomotivy 65E (E 499.2) [31]

„Výukový portál EDUCON obsahuje vytvořenou vizualizaci rozjezdu trakčního vozidla. Tato vizualizace popisuje pohyb pracovního bodu v poli trakčních charakteristik, zjednodušené schéma zapojení a spínací diagram. V Příloze 3 je náhled této vizualizace.“

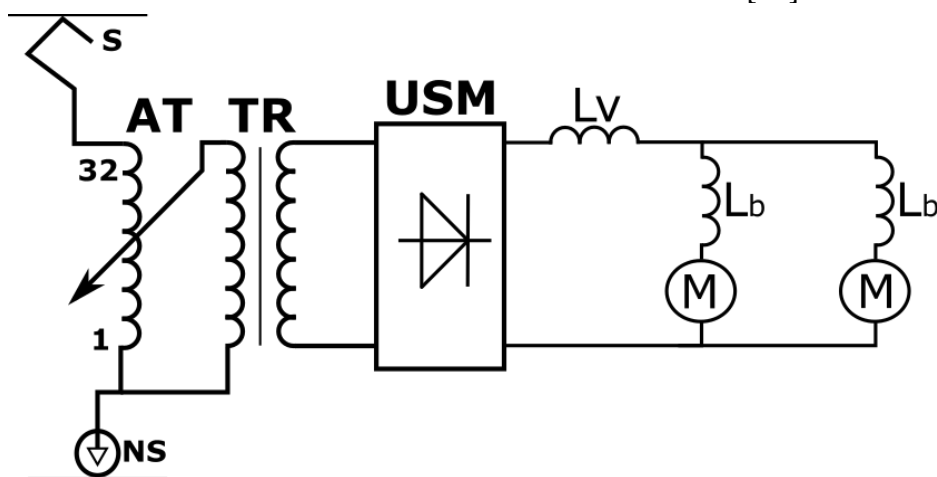
### 2.2.1.2 Trakční charakteristika - Stupňová odbočková regulace

Základní tvar trakční charakteristiky stupňové odbočkové regulace opět vychází z vlastní charakteristiky trakčního sériového motoru. I u tohoto typu regulace jsou vozidla vybavena stejnosměrnými sériovými motory s tím rozdílem, že se vozidla pohybují na střídavém napájecím vedení (v české republice 25 kV, 50Hz). Na železnici se dává přednost regulaci vysokonapěťové (Obrázek 15) před nízkonapěťovou. Požadovaný výkon se nastavuje přepínačem odboček na autotransformátoru, odkud dále proud vstupuje do trakčního transformátoru s pevným převodem. Podle zařazeného jízdního stupně je napětí upraveno v rozsahu 0 – 1 000 V. Poté je toto napětí usměrněno a připojeno na svorky trakčních motorů. Při odbočkové regulaci nedochází k nevhodné přeměně energie na teplo, jako u regulace odporové. Příkladem odbočkové regulace je lokomotiva Škoda 73E (S499.02), která pracuje s 32 jízdními stupni, za kterými následují 4 (odbuzovací) šentovací stupně. Přepínání odboček je realizováno pomocí pneumatického servomotoru s elektropneumatickými ventily, který je řízen ze stanoviště strojvedoucího skrze ovládací kontrolér. Zjednodušené zapojení obvodů lokomotivy s odbočkovou regulací



Obrázek 14 - Lokomotiva Škoda 73E (S499.02) [35]

je patrné z Obrázku 15. [17], [31]

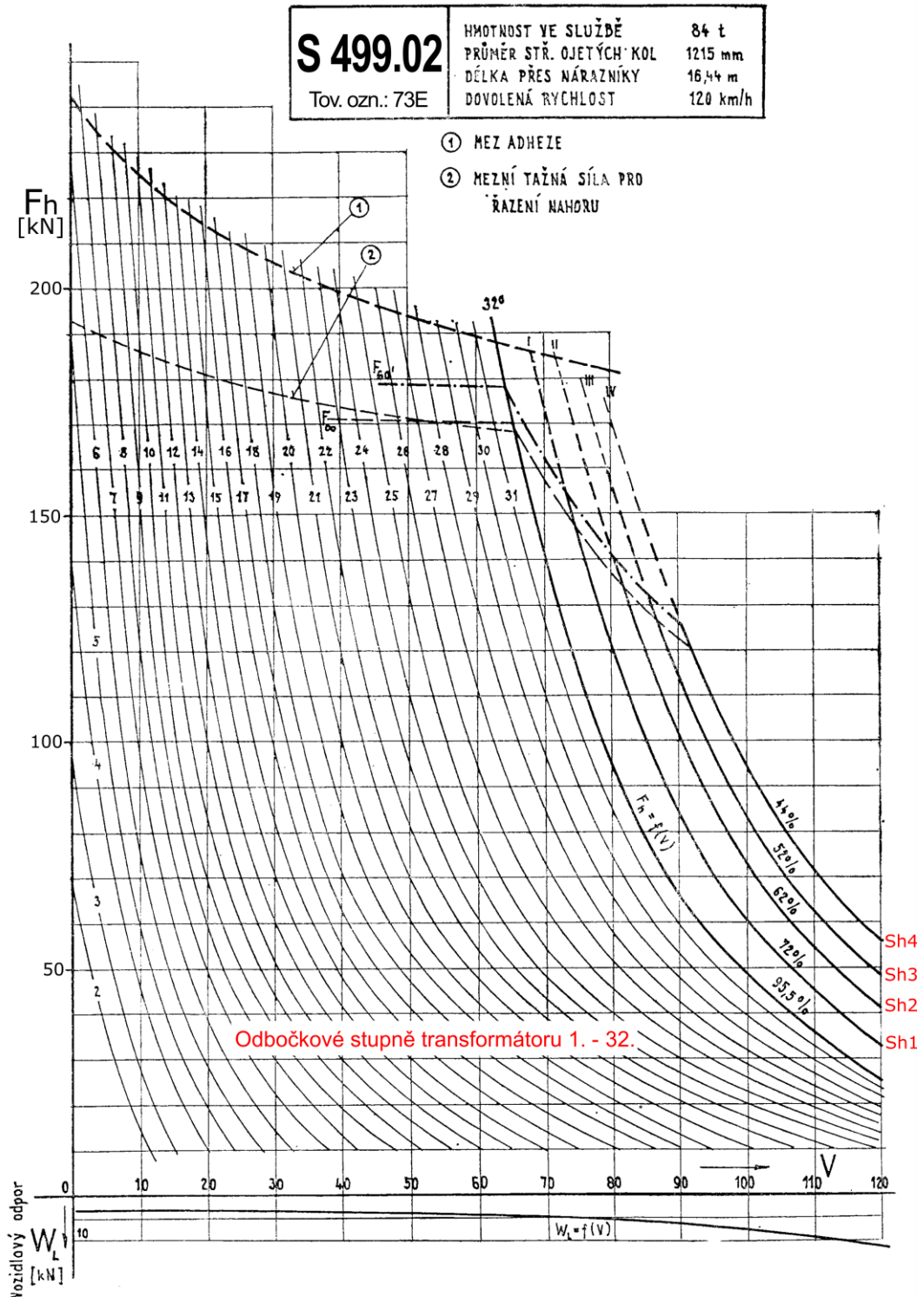


Obrázek 15 – Zjednodušené zapojení obvodů vysokonapěťové odbočkové regulace [18]

Tabulka 3 - Popis částí Obrázek 15

<b>S</b> -Sběrač	<b>TR</b> -Transformátor s pevným převodem	<b>Lb</b> -Budící vinutí
<b>NS</b> -Nápravový sběrač	<b>M</b> -Sériový stejnosměrný motor	<b>USM</b> -Blok usměrňovače
<b>AT</b> -Autotransformátor	<b>Lv</b> -Vyhlazovací tlumivka	<b>1÷32</b> Stupně

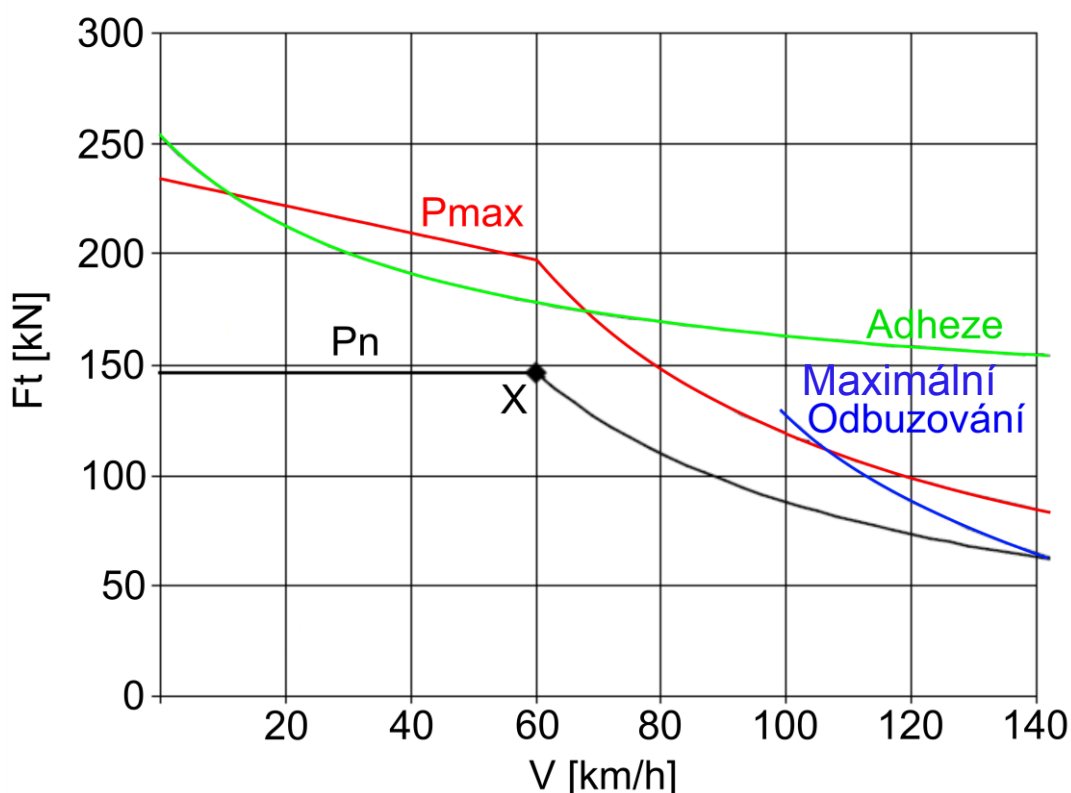
Pro možné srovnání se stupňovou odporovou regulací poslouží následující *Obrázek 16*. Jedná se o trakční charakteristiku výše zmíněné lokomotivy Škoda 73E. (*Sh1÷4*: Šentovací stupně)



Obrázek 16 – Odbočková trakční charakteristika lokomotivy 73E (S499.02) [31]

## 2.2.2 Trakční charakteristika – Plynulá regulace

Druhou skupinou trakčních charakteristik jsou charakteristiky plynulé regulace. Takovouto regulaci využívají stejnosměrné cize buzené trakční motory s pulsní či tyristorovou regulací a střídavé kmitočtově řízené asynchronní motory. Jelikož se jedná o plynulou regulaci, bude nás zajímat pouze obrys trakčních charakteristik pro jmenovité a maximální hodnoty. Trakční charakteristiky obou variant pohonu jsou velmi podobné, avšak liší se v několika málo bodech. U stejnosměrného pohonu lze trakční charakteristiku popsat následujícím obrázkem.



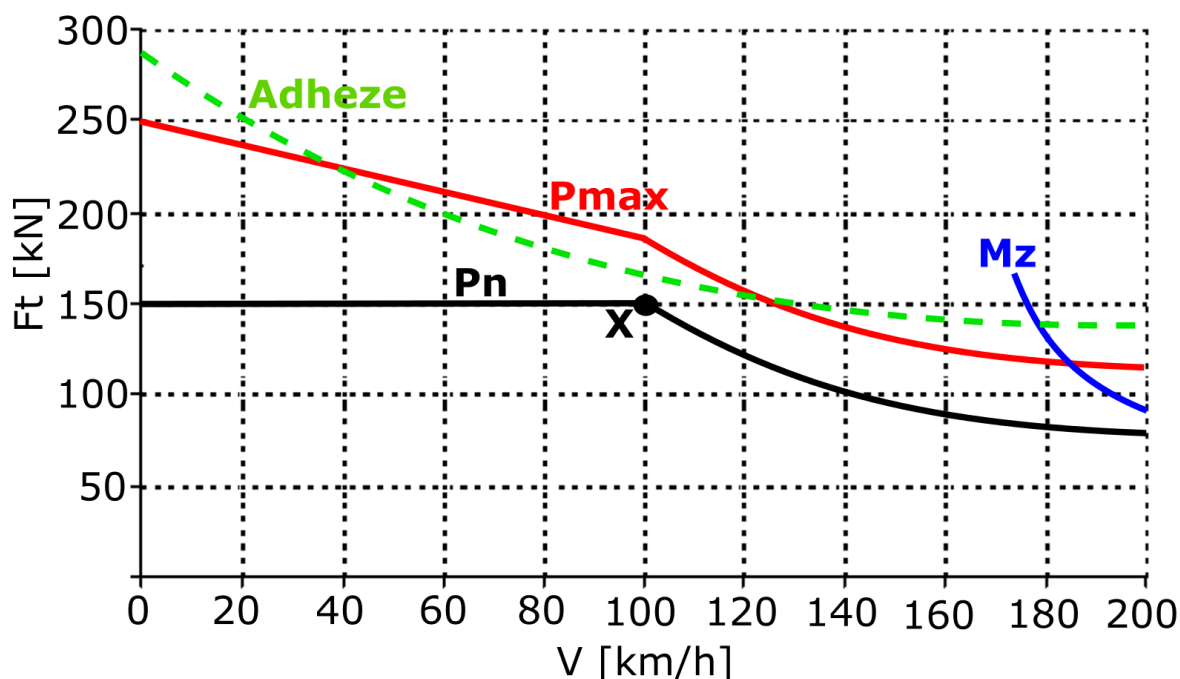
Obrázek 17 - Trakční charakteristika vozidla s plynulou regulací stejnosměrného motoru [20]

Trakční charakteristika obsahuje několik křivek. Černá barva - křivka trvalého výkonu, červená - omezení maximálním výkonem (proudem) měničů, modrá - omezení komutací při zeslabeném buzení (nejmenší dovolený poměr  $I_b/I_k$ ), zelená - omezení adhezí a v neposlední řadě omezení maximální rychlostí dle vozidla.

Pokud se zaměříme na trvalý stav, pak v první části trakční charakteristiky dochází k řízení napětí při plném buzení (do bodu X) až do hodnoty plného napětí. Následuje (od  $V=60$  km/h) odbuzování při maximální hodnotě napětí (pohyb bodu po výkonové hyperbole). [20]



Trakční charakteristika vozidel se střídavými asynchronními motory je velmi podobná trakční charakteristice vozidel s plynulou regulací stejnosměrných motorů. Příklad trakční charakteristiky vozidla s plynulou regulací asynchronních trakčních motorů je možné vidět na *Obrázku 18*. Jsou zde zakresleny křivky jmenovitého a maximálního stavu s několika důležitými omezeními. Regulace statorového napětí je omezena hodnotou napětí stejnosměrného meziobvodu, odkud jsou napájeny střídače trakčních motorů.



*Obrázek 18 - Trakční charakteristika vozidla s ASM [18]*

V první části trakční charakteristiky (přímka do bodu X) dochází k regulaci dle zachování poměru  $U_1/f = \text{konstantní}$ . To nám umožní dosáhnout účinku konstantní tahové síly. Jmenovitá tahová síla (jmenovitému proudu motoru) tak odpovídá přímka, končící ve jmenovitém bodě X při jmenovité rychlosti ( $V=100 \text{ km/h}$ ). V tomto bodě je dosaženo maximálního napájecího napětí  $U_1$ . S požadavkem na zvýšení rychlosti nastává stav odbuzování, u kterého je hodnota napájecího napětí konstantní a mění se pouze frekvence. Tento stav má průběh hyperbolický a to z důvodu zachování konstantního výkonu  $P = F_t \cdot V = \text{konst.}$  Omezení momentem zvratu  $M_z$  se v drtivé většině nachází až za maximální hodnotou rychlosti vozidla, tudíž se ani do trakčních charakteristik nevykresluje.

Opět je zde vidět omezení ( $P_{\text{max}}$ ) maximálním výkonem (proudem střídačů), který při dosažení způsobuje oteplení prvků střídače. Jedná se o tzv. krátkodobé stavy. Již zmíněné omezení výkonovou hyperbolou je zřejmé při stavu odbuzování. Dalším omezením je moment zvratu  $M_z$ , který má tvar hyperboly druhého řádu. Posledním zobrazeným omezením je adheze. [18], [20]

*„Výukový portál EDUCON obsahuje vytvořenou vizualizaci pohybu pracovního bodu v poli trakčních a brzdových charakteristik. Tato vizualizace popisuje rozjezd, jízdu a brzdění trakčního vozidla. Navíc je zde vytvořen Hodogram, zobrazující závislost rychlosti na ujeté vzdálenosti. Čtenář má možnost ovládní přechodu jednotlivých fází. V Příloze 4 je náhled této vizualizace.“*

### 3 Problematika brzd

Brzdy především slouží k zajištění bezpečnosti dopravy. Jsou nedílnou součástí každého vozidla, které má za úkol ať už vykonávat či nevykonávat pohyb. Brzdou lze nazývat každé zařízení, které svou funkcí vykonává regulaci (snižování) rychlosti pohybu vozidla či soupravy. Hlavní podstatou brzdění je schopnost udržení konstantní rychlosti soupravy na spádu, zpomalení či zastavení vozidla a následné zajištění vozidla v klidové poloze. To lze docílit umělým zvyšováním jízdních odporů nebo změnou smyslu tažné síly. Brzdnou sílu lze vytvořit různými způsoby, které budou popsány v následujících odstavcích. Jako nejnižší stupeň brzdění se uvádí takzvaná jízda „výběhem“, při které dochází k brzdění pouze vlivem jízdních odporů soupravy a sklonem tratě bez působení tažné síly. Při brzdění nastává hlavní problém v nutnosti odebrání velkého množství energie brzděné soupravy. Hodnota energie, závislá na hmotnosti soupravy a druhé mocnině rychlosti, může nabývat stejných hodnot, jako energie potřebná pro rozjezd. Existují dva základní typy brzdění, při kterých lze odebírat brzdnou energii.

U prvního způsobu dochází k přeměně brzdné energie v teplo. Toho se využívá například u takzvaného *Odporového brzdění*, kde se brzdná energie maří ve speciálně navržených odpornicích. Jedná se tedy o elektrické brzdění, při kterém se trakční motory využívají ve funkci generátorů. Odporové brzdění má prakticky nízké požadavky na údržbu. Přeměna energie na teplo se vyskytuje i u brzd, které spolupracují přímo s kolejnicemi. Jedná se o elektromagnetické kolejnicové a vířivé brzdy, u kterých dochází vlivem jejich působení k ohřevu kolejnic. U ostatních mechanických brzd, které pracují na bázi tření, dochází vlivem brzdění k ohřevu částí pevně spjatých s brzděním. U zdržových brzd se teplo odvádí do obou částí, jak do obručí kol, tak do litinových brzdových špalíků. S příchodem kotoučových brzd se mnohé nevýhody zdržových brzd vyřešily, nikoliv však dostatečný odvod tepla, který je proveden pouze skrz brzdové kotouče.

Druhý, efektivnější způsob brzdění je *Rekuperace*, při které lze zpětně využít brzdnou energii vytvořenou trakčním motorem pracujícím v generátorickém režimu. Aby mohlo docházet k brzdění pomocí rekuperace, musejí na to být vozidla i zdroje energie (trakční baterie, trolej) technicky uzpůsobené. Takto vytvořenou energii lze vracet do napájecí sítě nebo ji ukládat do akumulčních členů. [7], [17], [18], [20]



### 3.1 Rozdělení brzd

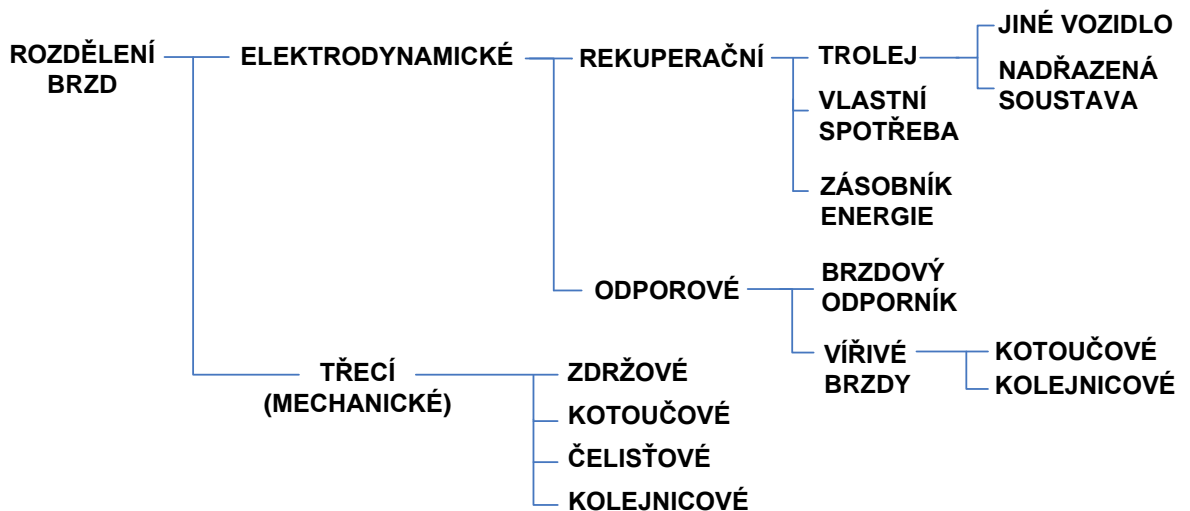
Prvotní rozdělení brzd je podle jejich umístění:

- Brzdové zařízení je součástí kolejového vozidla a je ovládáno obsluhou vozidla.
- Brzdové zařízení není součástí kolejového vozidla. Je umístěno na infrastruktuře železniční cesty, po které se vozidlo pohybuje. Je ovládáno externí obsluhou tratě.

Podle způsobu přenosu brzdné síly lze třídit brzdy na *adhezní* a *neadhezní*.

- Adhezní brzdy představují takové brzdění, u kterého se brzdná síla přenáší ve styku kola a kolejnice. Výsledná brzdná síla je silně závislá na koeficientu adheze mezi kolem a kolejnicí. Do této kategorie lze řadit brzdy zdržové, kotoučové, čelistové, ale i brzdění s využitím trakčního motoru. Adhezní brzdy patří u kolejových vozidel k nejběžněji používaným.
- Neadhezní brzdy působí přímo na kolejnice a nejsou tak závislé na kvalitě styku kola a kolejnice. Takovéto brzdy mají velkou škálu modifikací založených na brzdách kolejnicových. Jednou z nich je *magnetická kolejnicová brzda*. Tyto brzdy byly zpočátku nasazovány pouze na tramvajové vozy, ale s postupem času se jejich použití rozšířilo i na motorové a vysokorychlostní soupravy.

Pro názorný přehled brzdových zařízení slouží následující rozdělení.

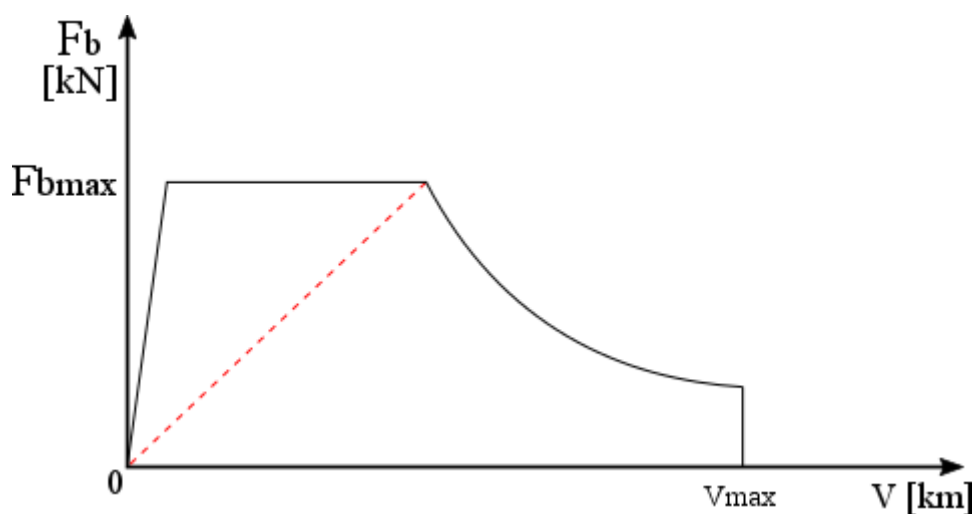


Obrázek 19 - Rozdělení brzd [18]

### 3.1.1 Elektrodynamické brzdy

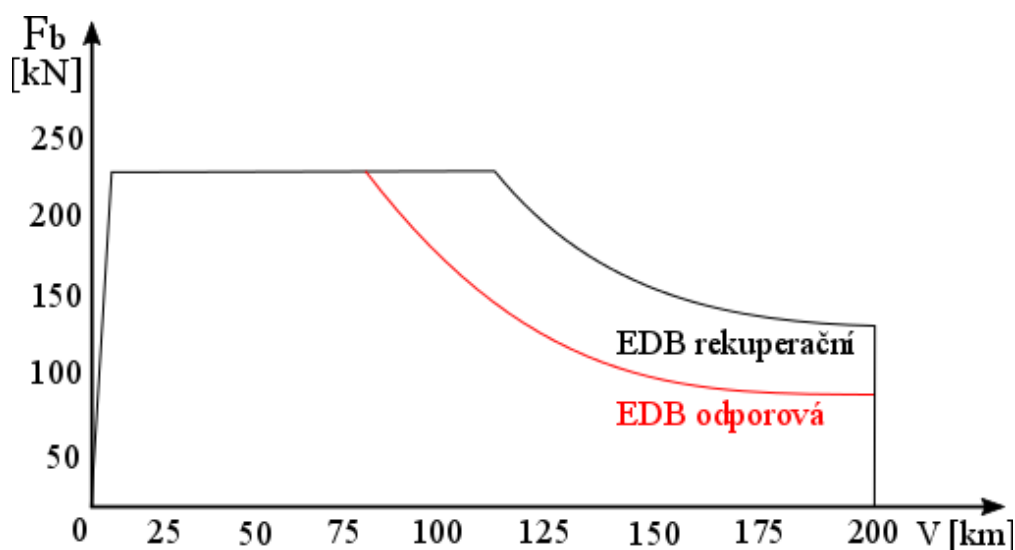
Elektrodynamickou brzdou (dále jen EDB) lze rozdělit na brzdou odporovou a rekuperační. Základ k vyvození brzdě síly spočívá v silovém působení magnetického pole a vodiče protékajícího proudem. Elektrodynamické brzdění je častěji nazýváno jako brzdění pomocí trakčních motorů, pracujících v generátorickém režimu. Také vířivé brzdy pracují na principu elektrodynamického působení. V obou případech se jedná o bezkontaktní brzdění, u kterého nedochází k opotřebení brzdových částí. Každou EDB lze popsat brzdovou charakteristikou, ve které se vynáší závislost brzdě síly na rychlosti.

Starším typem EDB je **odporové brzdění**, u kterého je vyrobená energie z generátorického chodu trakčního motoru následně mařena v brzdových odpornicích. Odporník je zařízení, v němž se elektrická energie mění v teplo. Velikost brzdě účinku závisí na technickém provedení odporníku. Brzdění do pevného odporu (*Obrázek 20* – čárkovaná křivka) nedovoluje využití dlouhodobého účinku maximální brzdě síly. Brzdění s maximálním brzděm účinkem se docílilo pulsním spínáním odporu. Z *Obrázku 20* je patrné, že v oblastech vysokých rychlostí je účinek brzdě síly omezen výkonem brzdě odporníku. Maximální brzdě síla, tak jako maximální tažná síla, je omezena povolenou hodnotou adheze. V nízkých rychlostech se nelze spolehnout na využití EDB k zastavení a udržení vozidla v klidovém stavu. Je nutné využít jiný druh brzdy vozidla, například mechanickou třecí brzdou. Důležitým prvkem elektrodynamické odporové brzdy je samotné chlazení odporníku. Kromě limitu adheze je chlazení omezujícím parametrem výkonu a brzdě síly odporové EDB. Tato skutečnost se následně projevuje v charakteristikách ve srovnání EDB odporové a rekuperační. [19], [20]



Obrázek 20 - Elektrodynamické odporové brzdění [18]

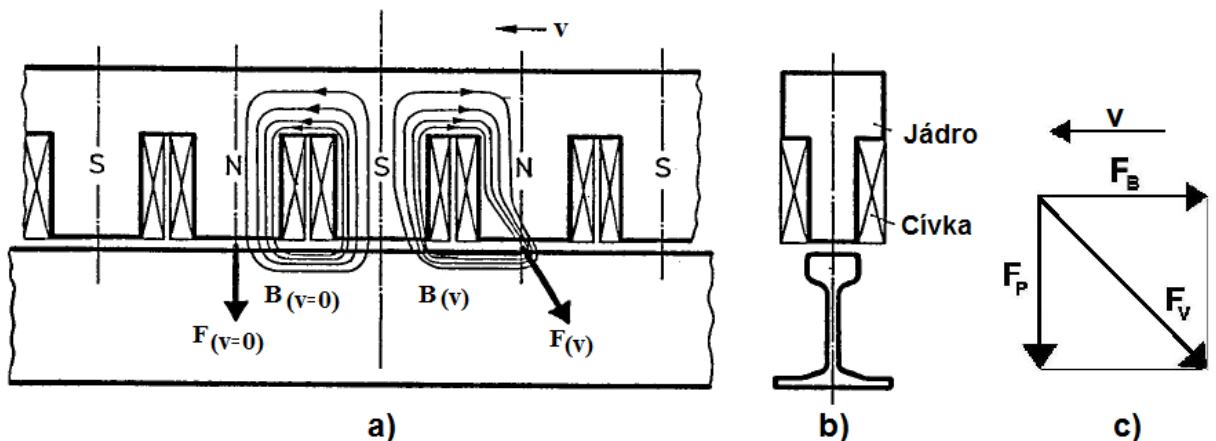
Novějším, bohužel u nás méně využívaným brzděním pomocí EDB je brzda **rekuperační**. V úvodu bylo vysvětleno, že při takovémto brzdění se trakční motor využívá ve funkci generátoru. U vozidla se stejnosměrným motorem dojde při rekuperaci k odpojení motoru, následnému nabuzení a připojení spotřebiče, který bude odebírat vytvořenou energii. Smysl působení trakčního motoru (generátoru) bude tedy opačný, oproti směru pohybu trakčního vozidla. Kategoricky novější vozidla s asynchronními motory využijí při rekuperačním brzdění trakční motor jako generátor, tudíž úhlová rychlost otáčejícího se rotoru bude vyšší než úhlová rychlost točivého magnetického pole. Brzdná síla je následně vyvolána kotvou, která se snaží přizpůsobit otáčkám točivého pole. Z toho vyplývá, že působí opět proti pohybu. Velkou výhodou oproti odporové EDB je to, že se vyrobená energie může zpětně využít. Rekuperovanou energii lze navrátit zpět do trolejového vedení (pokud je tomu uzpůsobeno) nebo ji uložit do akumulčních prvků umístěných na vozidlech. Rekuperovanou energii od brzdícího vozidla mohou použít pro trakci ostatní vozidla, nacházející se na stejné infrastruktuře. Existuje také možnost, kde by se energie vracela přes transformovnu přímo do nadřazené veřejné soustavy. Z důvodu nestálosti a velkých výkyvů výkonů se tato možnost víceméně nevyužívá. Brzdny účinek rekuperační EDB je silně závislý na možnosti odvedení brzdě energie. V případě, kdy není možné energii zpětně využít, navrátit do trakční soustavy nebo ji uložit do akumulčního prvku, se účinek rekuperační brzdy snižuje až k nule. Maximální brzdná síla je u rekuperační EDB dána součinitelem adheze. Jedná se tedy o adhezní brzdu. Oproti odporové brzdě zde není limitující faktor v podobě chlazení. U nově vznikajících vozidel se brzdová charakteristika rovná zrcadlově otočné křivce trakční charakteristiky vozidla. Srovnání účinků odporové a rekuperační EDB je možné vidět z *Obrázku 21* u lokomotivy Škoda 109E. Maximální brzdná síla je 226 kN.



Obrázek 21 - Porovnání odporové a rekuperační EDB [18]

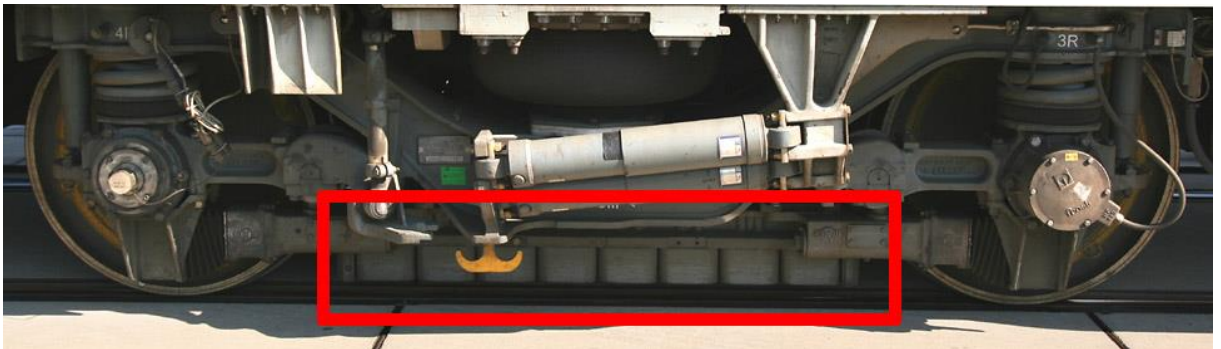
Výkon EDB lokomotivy Škoda 109E na obvodu kol je při rekuperaci roven 6963 kW, při odporovém brzdění je brzdňý výkon menší, a to 4400 kW. Brzdění pomocí rekuperační elektrodynamické brzdy se využívá především u vozidel lehké kolejové dopravy s velkým počtem rozjezdů a zastavení, například vozidel MHD či jednotek S-Bahn. Využíváním rekuperační EDB lze dosáhnout snížení energetické náročnosti provozu s následným využitím brzděné energie. Velkou výhodou obou EDB je také snížení opotřebení částí mechanického brzdového systému. U tohoto druhu brzdění (elektrodynamického) se na brzdění nepodílí žádné třecí dvojice, které by se mohly opotřebovat a znehodnocovat. U nově sestrojovaných vozidel se dává přednost brzdění EDB rekuperací až do možnosti jejího využití, následně dojde k jejímu vypnutí a přechodu na EDB odporovou. V nízkých rychlostech či velkých požadavcích na brzdění se dále využijí mechanické brzdy, například kotoučové. [19], [20]

Mezi elektrodynamické brzdy také patří brzdy **vířivé**, pracující na funkci vířivých proudů. Jejich princip je založen na elektromagnetickém působení, při kterém se proudy při brzdění indukují buď v kolejnicích (kolejnicové - neadhezní), nebo v kotoučích (kotoučové - adhezní). V místech, kde vířivé proudy vznikají, dochází k výraznému oteplení jejich částí. Teplo tak není soustředěno do jednoho místa, jako je to u odporové elektrodynamické brzdy (odporník). Vířivá elektrodynamická brzda je velmi podobná brzdě kolejnicové třecí, avšak zde nedochází k mechanickému kontaktu ani ke vzniku tření dvou stykových ploch. Výhodou je pak neopotřebovávání brzdových částí mechanismu. Hlavní rám nesoucí brzdňý mechanismus může být vybaven buď elektromagnety, nebo samostatně působícími permanentními magnety. Princip brzdění vířivými brzdami je na *Obrázku 22*. Brzdňá síla, která působí mezi brzdňým trámcem a kolejnicí, je vyvolána magnetickým polem. V trámci jsou uloženy elektromagnety, které při průchodu elektrického proudu vytvoří magnetické pole. Při nulové rychlosti je situace naznačena indexem ( $v=0$ ).



Obrázek 22 - Princip vířivé brzdy; a) Působení mag. pole, b) Příčný řez, c) Rozložení sil [19]

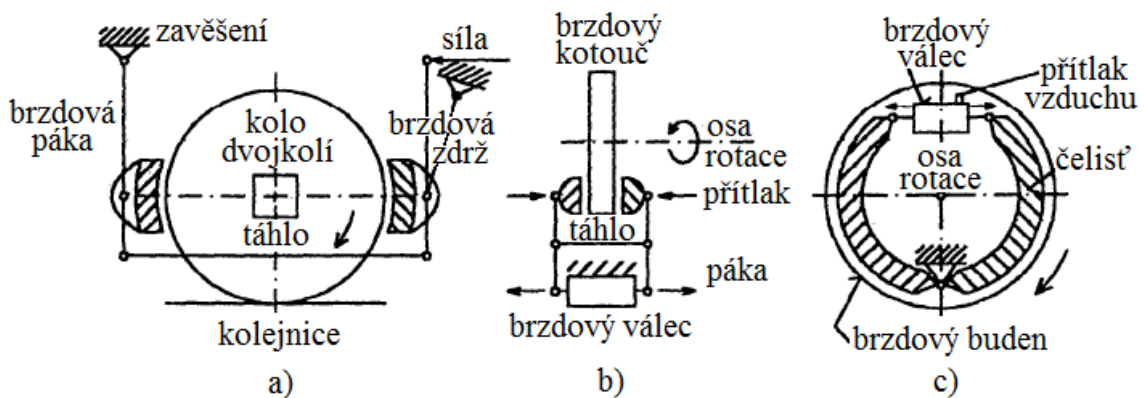
V tuto chvíli magnetická síla pouze přitahuje brzdový trámec ke kolejnici. Při pohybu vozidla ( $v$ ) dochází k deformaci siločar a tím je výsledná síla  $F_v$  odkláněna proti směru pohybu vozidla. Výsledná síla je rozložena mezi brzdou  $F_B$  a přitažlivou  $F_P$  složku. S nárůstem rychlosti se výsledný úhel zvětšuje. Brzdový trámec je používán v konstantní vzdálenosti od kolejnice, se vzduchovou mezerou přibližně 5-7 mm. Nastavení výšky brzdového trámce je prováděno pomocí pneumatických měchů. V oblastech nízkých rychlostí je vířivá brzda deaktivována a následně nahrazena mechanickou brzdou. Vířivá brzda našla velké využití u vysokorychlostních vozidel, u kterých je účinek brzděné síly podstatný. [19], [20]



Obrázek 23 - Příklad vířivé brzdy [21]

### 3.1.2 Třecí (Mechanické) brzdy

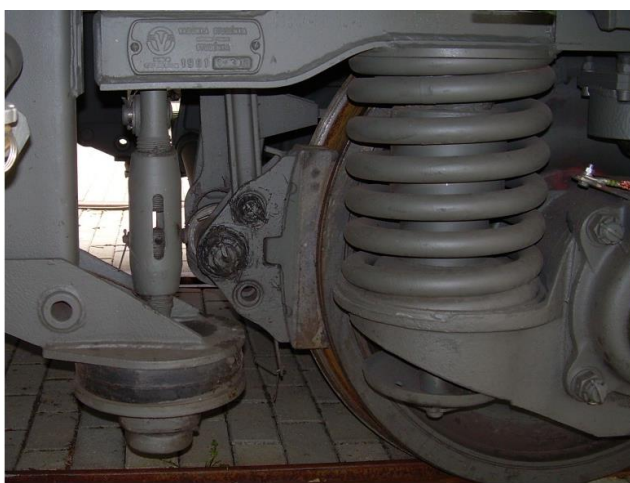
Nedílnou součástí každého kolejového vozidla jsou brzdy mechanické. Existuje několik druhů a jejich různých uspořádání. Mezi základní typy patří zdržové, kotoučové, čelist'ové a kolejnicové brzdy. Jelikož se jedná o brzdy třecí, spadají do skupiny adhezních brzd. Při aktivním stavu mechanických brzd se brzděná energie vlivem tření dvou brzdových částí mění v teplo. Hlavním rozdílem u těchto brzd je jejich funkce. Následující obrázek představuje funkci základních mechanických brzd.



Obrázek 24 - Mechanické brzdy; a) Zdržová; b) Kotoučová; c) Čelist'ová [17]



Prvním typem mechanické brzdy je brzda **zdržová**, též nazývána brzdou špalíkovou. Princip zdržové brzdy vychází z maření kinetické energie vlivem tření. Brzdová zdrž, nesoucí brzdny špalík dosedá vlivem tlaku brzdového válce na jízdní plochu brzděného kola vozidla. V začátcích používání tohoto typu brzd se instalovaly špalíky z dubového dřeva, které byly následně nahrazeny litinovými. V dnešní době se můžeme setkat s brzdovými špalíky, které jsou vyrobeny z kompozitních materiálů. Tyto nové materiály mají výhodu v nižším stupni hlučnosti a stabilnějším součiniteli tření. Výhodou zdržových brzd je jejich jednoduchá konstrukce, kontrola opotřebení a následná výměna. Využívají se také k očištění jízdních ploch kol. Nevýhodou a rizikem jejich intenzivního používání je skutečnost nadměrného přehřátí a následná porucha kola vozidla. [17], [22]



Obrázek 25 - Zdržová mechanická brzda [23]

Dalším typem mechanické brzdy je brzda **čelist'ová**. Její používání bylo spíše výjimečné. Jak je z *Obrázku 24c* patrné, brzdového účinku se dosahuje působením čelistí na plochu brzdového bubnu. Skrze brzdový válec se reguluje přítlak vzduchu (kapaliny) brzdových čelistí, které dosedají na brzdový buben. Mezi čelistmi a bubnem tak vzniká tření. Kinetická energie se následně přeměňuje na energii tepelnou a vlivem tření je vytvořena brzdná síla. Celý brzdový mechanismus je uzavřený v brzdovém bubnu a tím je chráněn proti nepříznivým vlivům a nečistotám. Tento druh brzdy umožňuje spojení klasické brzdy s brzdou parkovací. Nevýhodou je přehřátí vlivem intenzivního brzdění a následné ztracení brzdového účinku. [17], [22]



Obrázek 26 – Čelist'ová brzda [24]

Třetím, v současné době nejvíce nasazovaným typem, je brzda **kotoučová**. Tato brzda se hojně vyskytuje u nových osobních vozů, jednotek či hnacích vozidel dosahujících vysokých rychlostí. Jedná se o nástupce mechanické brzdy zdržové. Kotoučová brzda, myšleno jako celek brzdné soustavy, obsahuje mnoho potřebných částí. Mezi ty základní a funkci důležité části kotoučové brzdy lze zařadit brzdový kotouč, brzdový válec a brzdové destičky umístěné na čelistech. Požadovaného brzdného účinku se dosahuje vyvinutím tlaku prostřednictvím brzdového válce působícího na čelisti (brzdové destičky), které dosedají na plochu brzdového kotouče. Destičky jsou uloženy ve speciálních třmenech. Umístění brzdového kotouče může být různé. Volí se buď na nápravách (*Obrázek 28*), nebo dle prostorového řešení vozidla s přednostním umístěním na částech, které slouží k přenosu momentu z motoru na nápravu, například konec hřídele trakčního motoru či umístění na dutém hřídeli. Existuje i varianta s uložení přímo na disku kola vozidla (*Obrázek 27*). Brzdové destičky jsou vyrobeny z různých materiálů. Jedná se o lehké uhlíkové kompozity, keramiku či spékané materiály. Brzdový kotouč může být litinový, ocelový či keramický. Kotoučové brzdy mají oproti zdržovým výhodu v nižší hmotnosti (cca o 40%), větším součiniteli tření při vysokých rychlostech (u zdržových klesá), nižší hlučnosti při brzdění a především větší účinnosti. Nevýhodou je naopak složitější konstrukce, nemožnost fyzické kontroly brzdového systému (zabrzděno/odbrzděno) nebo nutnost častějších kontrol správné funkce či obložení. Absence čištění jízdnic ploch kol (výhoda u zdržové brzdy) se řeší přidavným čistícím špalkem. [17], [22]



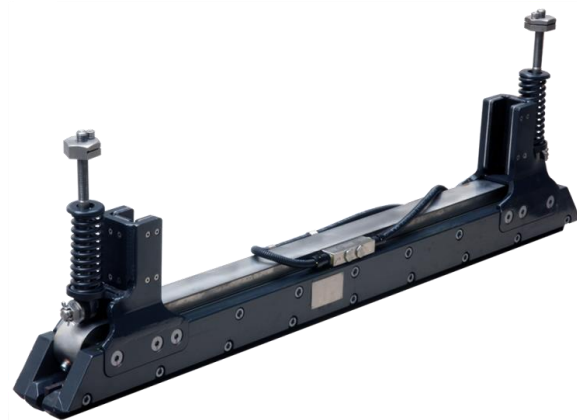
*Obrázek 27 - Kotoučová brzda na disku kola*  
[24]



*Obrázek 28 - Kotoučová brzda na nápravě*  
[25]

Posledním a základním druhem mechanických brzd je brzda **třecí kolejnicová**. Jedná se o brzdu ze skupiny neadhezních. Svým tvarem je velmi podobná brzdě vířivé kolejnicové, avšak její princip brzdění se liší. V drtivé většině je umístěna mezi nápravami

vozidla nad temenem kolejnice. Existují dva typy třecí kolejnicové brzdy. Jedná se o elektromagnetickou kolejnicovou brzdou a brzdou s permanentními magnety. Dalším rozdělením je výška uložení samotného trámce, to znamená nízko (8-10 mm) nebo vysoko (55 mm) zavěšené. Brzdná síla je vyvolána elektromagnety (nebo permanentními magnety) umístěnými v brzdovém trámci, které svou magnetickou silou přitáhnou brzdový trámec ke kolejnici, a tím vznikne tření dvou ploch. Velikost brzdné síly je závislá na velikosti přitlačné síly (buzení), délce brzdného trámce a na součiniteli smykového tření (vhodná volba materiálu). Elektromagnety, osazené na brzdovém trámci jsou napájeny z důvodu nezávislosti (trolejové vedení) z trakční baterie. Výhodou permanentních magnetů je jejich nezávislost na elektrické energii. Proto se mohou využívat jako parkovací brzdy. Kolejnicové brzdy se zpravidla neregulují, a proto se nehodí pro provozní brzdění. Vlivem opotřebování se tyto brzdy používají jako nouzové, parkovací či zajišťovací. Svojí funkcí mohou doplňovat ostatní brzdy, například při dobrzdování v nízkých rychlostech. Mohou také posloužit jako čisticí prostředek kolejnic adhezním brzdám. Často tyto brzdy bývají součástí brzdového systému u vysokorychlostních vozidel, kde se nejprve využijí jako vířivé brzdy a následně pro dobrzdění jako třecí kolejnicové brzdy. Masivní nasazení je ovšem u tramvají MHD. [19], [20]



Obrázek 29 - Brzdový trámec  
[26]



Obrázek 30 - Třecí kolejnicová brzda  
[27]

### 3.2 Pneumatické brzdy kolejových vozidel

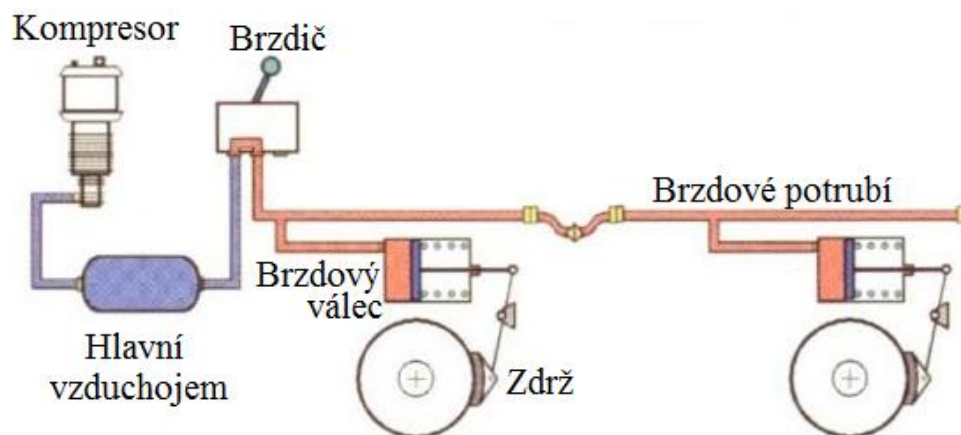
Základním prvkem železničních kolejových vozidel jsou brzdy pneumatické, využívající pro vyvození přitlačné síly stačený vzduch. Dle Dopravního řádu drah, který uvádí: „*Vlak, jehož stanovená rychlost je vyšší než 40 km/h musí být brzděn průběžnou brzdou samočinnou*“ [28] je nezbytnou nutností, aby takovýto systém brzdění vozidlo obsahovalo. Tento požadavek je na vozidlech splněn tlakovou brzdou, která se uvádí jako brzda průběžná. Kompresory, umístěné na kolejovém vozidle, slouží jako zdroj



stlačeného vzduchu pro vzduchojemy. Obvykle jsou nastaveny tak, aby regulovaly tlak na hodnotu 8 až 11 barů (0,8 – 1,1 MPa). Jedná se o kompresory pístové či rotační, které jsou poháněny elektromotorem. Ovládacím médiem brzdného účinku na vozidlech je stlačený vzduch, který je rozveden pomocí brzdového potrubí po celé délce soustavy. Působením takto stlačeného vzduchu na píst brzdového válce dochází k nárůstu brzdné síly. K základnímu rozdělení pneumatických brzd postačí dvě kategorie. Dělí se podle ovládání tlaku vzduchu, který je přiváděn na brzdový válec. Jedná se o brzdu přímočinnou a brzdu samočinnou. [17], [20]

### 3.2.1 Přímočinná brzda

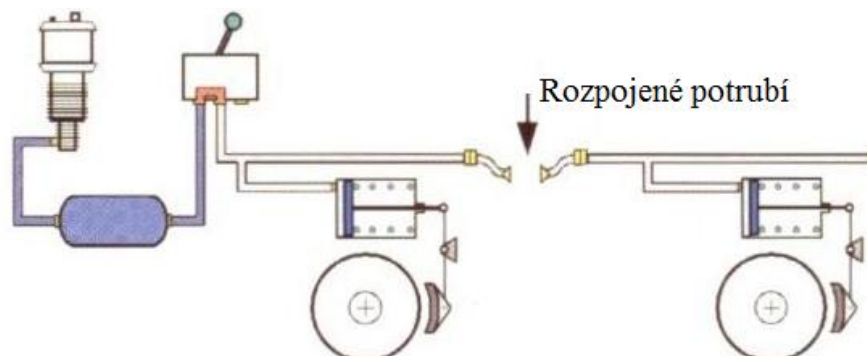
Tato brzda patří mezi nejstarší typ pneumatického brzdění, a to díky svojí jednoduchosti. Rozděluje se podle ovládání vzduchu na výchylkovou a přírůstkovou. První z nich se ovládá ručním upravovačem tlaku, který vpouští určitou hodnotu tlaku vzduchu pro brzdění. Druhá, přírůstková, ručně ovládá napouštěcí a vypouštěcí ventil, kterým se řídí tlak v brzdovém válci. Tlak, který může vzniknout v brzdovém válci, se rovná tlaku vzduchu v napájecím potrubí. Tato brzda se nepoužívá jako brzda průběžná. Důvodem je riziko výskytu přetrhnutí (rozpojení) napájecího potrubí za brzdičem. V takovém případě by přestala brzdít celá připojená souprava. Často je tato brzda označována za lokomotivní či přídatnou, sloužící pro brzdění pouze trakčních vozidel. Zjednodušený princip přímočinné brzdění je možný vidět na *Obrázku 31*. [17], [22]



Obrázek 31 – Působení přímočinné brzdění [29]

Kompresorem, umístěným v hnacím vozidle, je dodáván stlačený vzduch přes zpětný ventil do hlavního vzduchojemu. Tlak o hodnotě až 11 barů je skrze redukci snížen na 5 barů. Polohou brzdiče (brzdič přímočinné brzdění) se skrz brzdové potrubí přímo reguluje tlak v brzdovém válci. Tím dochází k brzdění soupravy.

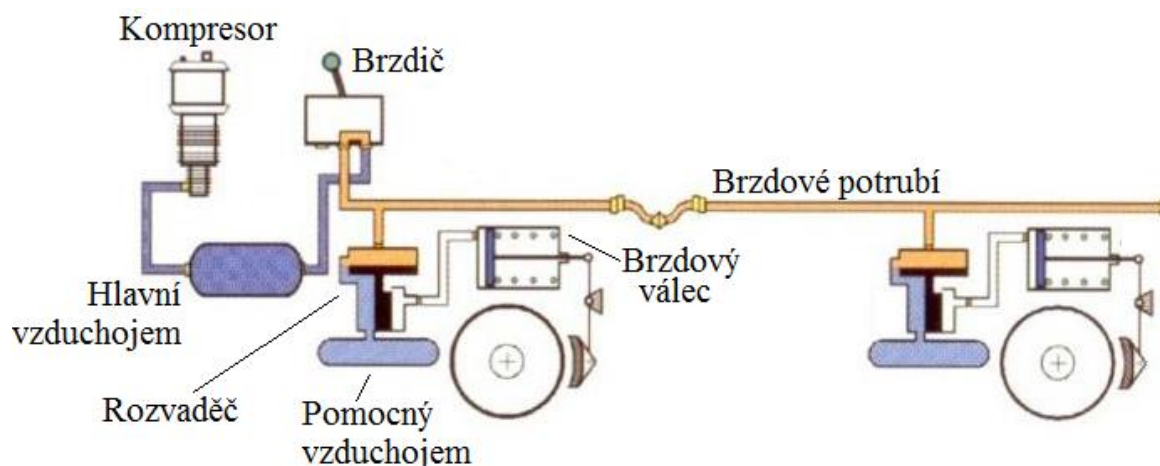
Pokud by došlo k přerušení brzdového potrubí na soupravě (viz. *Obrázek 32*), dojde k okamžitému odstavení brzdného účinku celé soupravy. Tento stav je brán za rizikový a z toho důvodu je kolejové vozidlo vybaveno brzdou samočinnou, která tento problém řeší. [22]



*Obrázek 32 – Rozpojené brzdové potrubí přímočinné brzdy [29]*

### 3.2.2 Samočinná brzda

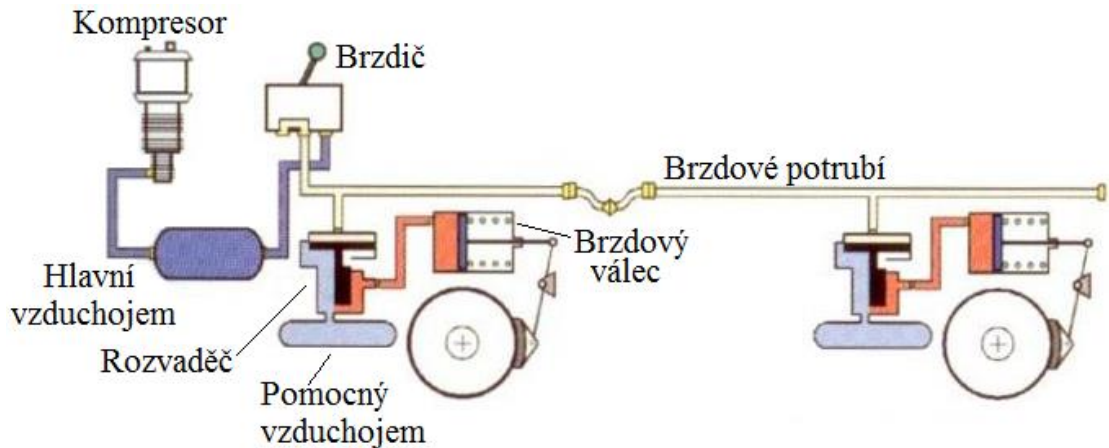
Samočinná brzda, často nazývána vlakovou či průběžnou brzdou, je charakteristická pro železniční kolejová vozidla. Tato brzda splňuje požadavek Drážního úřadu na průběžnost i samočinnost. Její funkcí je odstraněna rizikovost nefunkčnosti brzd při přerušení soupravy. Průběžnost umožňuje ovládat brzdy všech připojených kolejových vozů z jednoho místa (ze stanoviště hnacího vozidla či při zapůsobení záchranné brzdy ve vozech). Pojem samočinnost si lze vysvětlit jako samočinné uvedení brzdového systému do provozu při přerušení brzdového potrubí soupravy. Brzdový systém je na rozdíl od přímočinné brzdy vybaven pomocným vzduchojemem a rozvaděčem.



*Obrázek 33 - Samočinná brzda – Odbrzděno [29]*

Po naplnění brzdového potrubí a všech pomocných vzduchojemů na provozní hodnotu tlaku 5 barů je samočinná tlaková brzda připravena k použití. V tuto chvíli je souprava odbrzděna (viz. *Obrázek 33*). Brzdové potrubí je skrze spojky a hadice propojeno v celé soupravě vlaku.

Brzda se uvede v činnost, pokud dojde ke snížení tlaku v hlavním (brzdovém) potrubí. To lze vyvolat brzdíčem umístěným na stanovišti strojvedoucího. Snížením tlaku v potrubí se vyšle impuls všem rozvaděčům soupravy, které řídí činnost tlakové brzdy. Z pomocného vzduchojemu se pustí do brzdového válce příslušné množství tlakového vzduchu.



Obrázek 34 - Samočinná brzda – Zabrzděno [29]

Nejvyššího brzdného účinku se docílí při úplném provozním brzdění, při kterém dojde k poklesu tlaku vzduchu brzdového potrubí o 1,5 baru. V ten okamžik působí na brzdový válec tlak 3,5 baru. Další snižování tlaku brzdového potrubí se nepodílí na zvětšení brzdného účinku. Jako rychločinné brzdění se uvádí situace, při které dojde k náhlému a úplnému vyprázdnění brzdového potrubí. Po zvýšení tlaku v brzdovém potrubí se vlivem rozvaděče sníží tlak v brzdovém válci a dojde k odvětrání vzduchu do ovzduší a následnému odbrzdění soupravy. [17], [22]

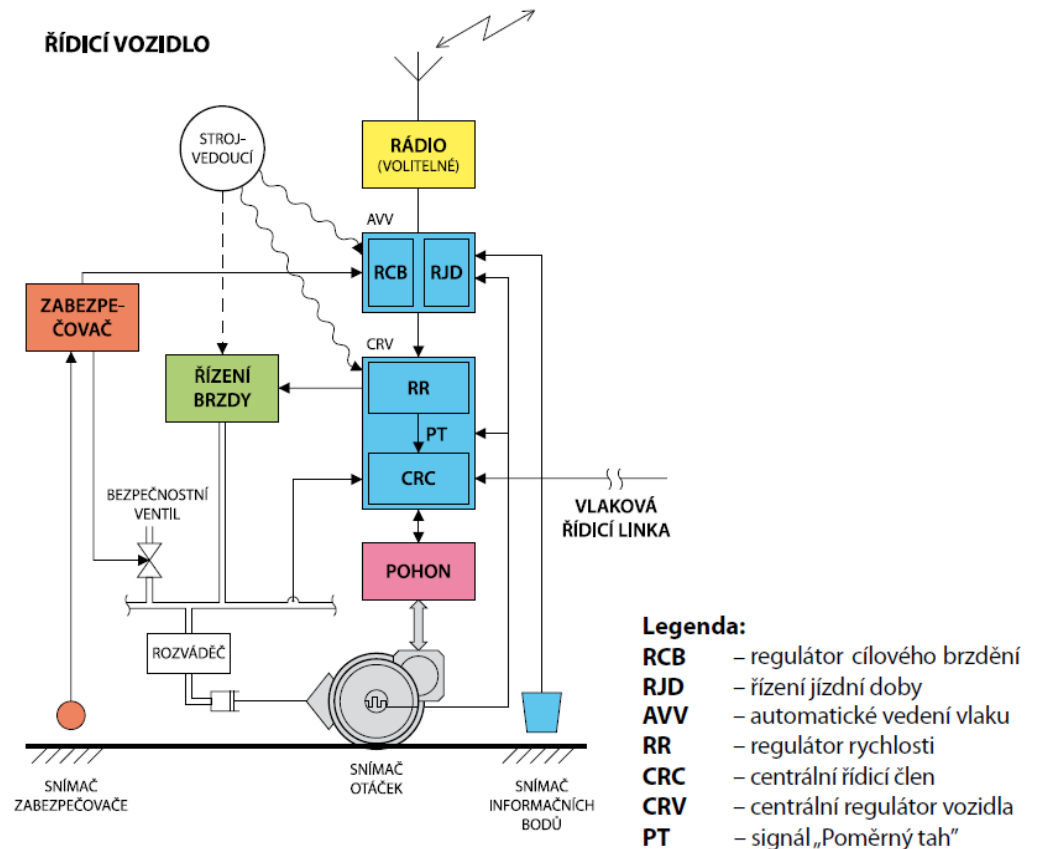
„Výukový portál EDUCON obsahuje odkazy na popis funkce Rozvaděče. Viz. Příloha 6.“

U nových či rekonstruovaných lokomotiv je funkce tlakové brzdy řízena elektrickým ovládním. Využívají se tlaková relé a stykače, které slouží k usnadnění a zjednodušení ovládní tlakových brzd. Základem jsou elektrické brzdíče s příslušnými ovladači.

Z bezpečnostních důvodů jsou vozidla vybavena hned několika druhy brzdových zařízení, které jsou svojí funkcí na sobě nezávislé. Tím je tedy nutné zajistit jejich preferenci a součinnost působení. Hlavním požadavkem je zajištění přednosti brzdění před tahem nebo jízdě výběhem. Existuje několik pravidel, které zajišťují efektivnost brzdění. U trakčních vozidel se využívá přednosti elektrodynamického brzdění před mechanickým třecím. Tím se odstraní problém s opotřebáváním brzdových částí. Pokud je vozidlo vybaveno rekuperační elektrodynamickou brzdou, využívá se přednostně před brzdou odporovou. Zálohou EDB na lokomotivě a hlavní provozní brzdou na připojených vagónech se využívá třecí brzdy. Z hlediska bezpečnosti a spolehlivosti je třecí brzda nezbytná. [20]

### 3.3 Cílové brzdění

Problematika cílového brzdění je velmi obsáhlá. V první řadě je nutné vysvětlit hierarchii nadřazeného systému pro automatizaci řízení kolejových vozidel. Tento systém se skládá z CRV (Centrální Regulátor Vozidla) a ze systému AVV (Automatické Vedení Vlaku). Nadřazený celek složený z těchto dvou systémů se nazývá ATO (Automatic Train Operation - Automatické řízení vlaku). Systém ATO umožňuje provozní ovládání trakčního pohonu a brzdového systému. Funkce tohoto systému tkví v možnosti vést vlak požadovanou rychlostí, cílově zastavit s vysokou přesností (1-3 metry) a při tom minimalizovat spotřebu energie vlaku tak, aby přijel do cíle včas. AVV se skládá z funkční (řídící počítač, snímače informačních bodů), datové (popis tratí, data z jízdních řádů) a traťové části (Traťové magnetické informační body MIB). Blokové uspořádání vlakového systému je patrné z Obrázku 35.

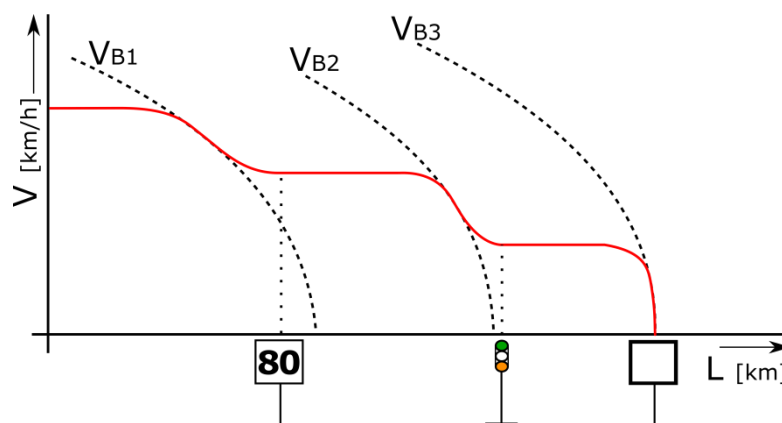


Obrázek 35 - Popis systému AVV & CRV [44]

Vrcholnou částí systému ATO je regulátor cílového brzdění a regulátor jízdní doby. Cílového brzdění je dosaženo pomocí regulátoru cílového brzdění RCB, který řídí brzdový systém vlaku prostřednictvím regulátoru rychlosti tak, aby vlak sledoval předvypočítanou brzdovou křivku. Díky poměrně strmé brzdě křivce nedochází vlivem cílového brzdění ke zbytečnému přebrzdění. Tyto křivky se počítají online v reálném čase z aktuální polohy a



rychlosti vlaku společně s předem uložených dat v systému. *Obrázek 36* zobrazuje navedení vlaku na sníženou rychlost ( $V_{B1}$ ,  $V_{B2}$ ) a následné zastavení dle křivky cílového brzdění.



*Obrázek 36 – Příklad křivek cílového brzdění*

Hlavním úkolem RCB je cílové brzdění k rychlostníkům, návěstidlům a zastávkám s přesností zastavení až 1 metru nebo k přizpůsobení rychlosti vlaku pomalým jízdám.

První použitý regulátor cílového brzdění byl zaveden na trase C pražského metra. Tyto regulátory byly založeny na analogové technice. V dnešní době mají kolejová vozidla ČD regulátory cílového brzdění číslicové.

Nezbytnou částí systému AVV, tedy i cílového brzdění, je instalace magnetických informačních bodů (MIB), sloužících k určení polohy vlaku v okamžiku průjezdu soupravy. Magnetické IB se skládají ze dvou šestimetrových, plastových (dříve dřevěných) hranolů, umístěných v podélném směru mezi kolejnicemi, viz *Obrázek 37*.



*Obrázek 37 – Umístění magnetických informačních bodů MIB [44]*

Dvojice MIB obsahuje celkem 8 permanentních magnetů, které vytváří svým umístěním a polaritou až 30 624 specifických kódovaných informací. Komunikace mezi vozidlem a

traťovým systémem probíhá prostřednictvím dvou snímačů, uložených ve spodní části vozu, přibližně 20 cm nad daným MIB. Informační body poskytují neproměnnou informaci určující pouze polohu vlaku. Ostatní informace získává AVV z mobilní části, ve které jsou uloženy mapy tratě. [42], [43], [44]

Čtení magnetických informačních bodů s využitím cílového brzdění dovolují některé vozy ČD, například jednotky 471 (CityElefant), nové lokomotivy řady 380 ČD (Škoda 109E), řídicí vozy „Sysel“ řady Bfhpvee295, modernizované lokomotivy 362 ČD nebo také přes 50 modernizovaných souprav metra 81-71M linky A. [43]

*„Výukový portál EDUCON obsahuje vytvořenou vizualizaci cílového brzdění. Tato vizualizace popisuje rozjezd, jízdu a brzdění trakčního vozidla dle křivky cílového brzdění za zjednodušených předpokladů. Vizualizace obsahuje trakční a brzdovou charakteristiku, tachogram a hodogram. Čtenář má možnost ovládní přechodu jednotlivých fází. V poslední fázi lze dodatečně nastavit hodnotu tažné síly nebo dosažené rychlosti v porovnání se základním případem. V Příloze 5 je náhled této vizualizace.“*

## 4 Pomocné pohony na vozidle elektrické trakce

Součástí vozidel elektrické trakce je kromě hlavní elektrické trakční výzbroje i mnoho dalších elektrických pohonů a zařízení, které jsou pevně spjaty s provozem daného vozidla. Tato zařízení se musejí brát v potaz z důvodu vlastní spotřeby a pro následné zjištění celkové účinnosti vozidla. Pro snížení vlastní spotřeby vozidla se tato zařízení musejí vhodně řídit, například ventilaci podle daného zatížení lokomotivy. Existuje několik variant pro napájení těchto pomocných zařízení. Mohou být napájeny:

- přímo z troleje (málo vhodné, galvanicky neoddělené)
- z troleje přes měnič či transformátor
- pomocí stlačeného vzduchu (používáno u mechanických brzd)
- z akumulátorové baterie, umístěné na vozidle.

U vozidel závislých je primárním zdrojem trolejový vodič. Pro tato vozidla je tedy rozhodující používaný trakční systém. U stejnosměrného systému dále rozhoduje hladina napájecího napětí. Vozidlům pohybujících se na střídavém systému je umožněno napájet zařízení vlastní spotřeby z pro ně určených vinutí transformátoru. Tím je docíleno galvanického oddělení napájených obvodů zařízení od trolejového vedení. Toho lze dosáhnout u stejnosměrných vozidel použitím soustrojí sestaveného ze střídače a transformátoru. Napájením zařízení přímo z troleje přes vinutí transformátoru se dosahuje vyšší energetické úspory. Toho bývá využito u vlakového topení. Je zřejmé, že ve většině případů je nutné prvotní energii transformovat na nižší hladinu. To v sobě skrývá vytvoření ztrát a následné snížení účinnosti.

Hladiny napětí používané na kolejových vozidlech lze rozřadit do následujících skupin:

- Stejnosměrné napětí o velikosti 220 V, 440 V – napájení ss motorů
- Stejnosměrná palubní síť 540 V až 650 V. Běžně na vozidle 570 V pro napájení střídačů ASM a dalších spotřebičů.
- Jednofázové napětí 230 V či 400 V, 50 Hz (starší provedení)
- Stejnosměrné napětí z baterie: 12, 48, 72 a 110 V.

Důležitá je stabilizace napětí a následné použití dalších opatření, například sinusových filtrů pro omezení vyšších harmonických. Výkony pomocných zařízení jsou velmi rozmanité, začínajícími jednotkami W až po hodnoty stovek kW.

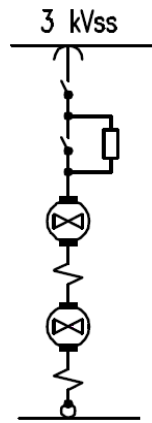
Za jednu z hlavních kapitol vlastní spotřeby vozidla lze považovat pomocné pohony. Tyto pohony, dosahující značného výkonu, jsou blízce vázány na funkčnost ostatních trakčních zařízení. Mezi pomocné pohony lze řadit zařízení jako ventilátory, kompresory či čerpadla. V dřívějších dobách by se za pomocný pohon mohl považovat i nabíječ, který byl tvořen pomocným dynamem. V dnešní době je nahrazen střídačem a transformátorem. [30]

## 4.1 Ventilátory

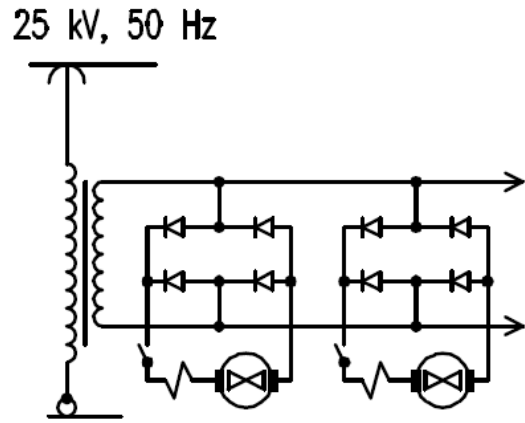
Ventilátory patří do hlavní skupiny pomocných pohonů. Jejich funkce spočívá v nuceném vzduchovém chlazení, potřebném především pro rozjezdové či brzdové odporníky, měničové skříně, trakční motory nebo ostatní zařízení závislé na teplotě. Obvykle se používají axiálním nebo radiálním provedení. Napájení těchto pomocných pohonů se liší dle provedení samotného vozidla. U vozidel stejnosměrné trakce (3 kV) se pomocné pohony řešily sériovými motory napájenými z trolejového vedení, které byly spojovány do motorových skupin obdobně jako trakční motory. Spouštění ventilátorů bylo prováděno ve dvou stupních s ohledem na proudové a momentové rázy. Nevýhodou byla konstrukční velikost a váha těchto motorů. U střídavé trakce stejné generace vozidel se jako pohon ventilátorů používal stejnosměrný sériový motor napájený z usměrňovače ze samostatného vinutí transformátoru. S postupem času se diodový usměrňovač nahradil řízeným tyristorovým usměrňovačem, který nabízel možnost plynulého rozběhu a řízení otáček. Další možností bylo využití jednofázového asynchronního motoru s kondenzátorovou fází spouštěného stykačem ze samostatného vinutí. Asynchronního motoru se ovšem využívalo také v třífázovém provedení, kde byl motor ventilátoru napájen z tzv. Arno-měniče. Stejnosměrné motory mají oproti asynchronním motorům výhodu v nezávislosti momentu při poklesu napájecího napětí. Vyžadují vyšší úroveň údržby z důvodu nutnosti sběracího ústrojí. Jako příklad napájení motorů ventilátorů poslouží následující obrázky.

*„Výukový portál EDUCON obsahuje tabulku s vysvětlením jednotlivých schématických značek, použitých v obrázcích pomocných pohonů. Tu lze nalézt v Příloze 7“*



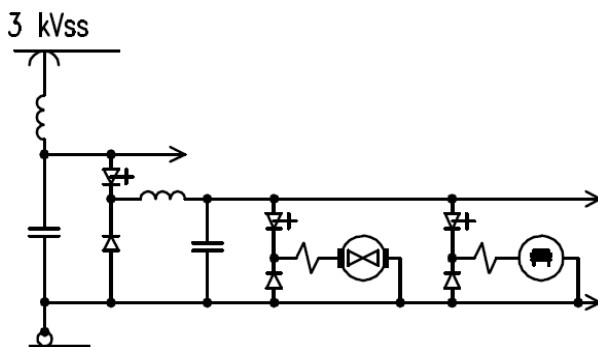


Obrázek 38 - Pomocné pohony napájené ze stejnosměrné troleje [30]

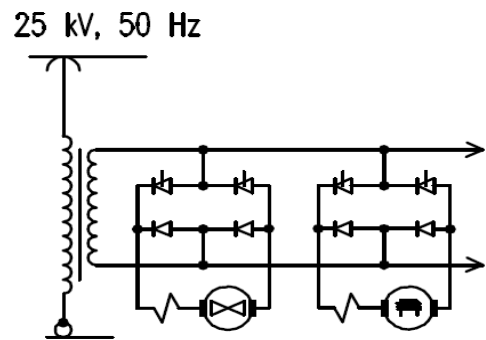


Obrázek 39 - Pomocné pohony napájené ze střídavé troleje přes usměrňovač [30]

Od doby, kdy byla zavedena pulzní regulace, se na stejnosměrných vozidlech používají stejnosměrné motory napájené (řízené) z pulzních měničů. U stejnosměrné trakce 3 kV se používá snižovací pulzní měnič, který vytváří pomocnou stejnosměrnou síť 440 Vss. Z této sítě jsou napájeny přes vlastní pulzní měniče jednotlivé motory ventilátorů. Pulzní regulace umožnila úsporu hmotnosti, plynulý rozběh a řízení otáček. Nevýhodou tohoto uspořádání je nemožnost galvanického oddělení od troleje. Z důvodu nutné údržby stejnosměrných motorů se volil co možná nejmenší počet těchto motorů, ovšem s rizikem nižší účinnosti chlazení.



Obrázek 40 - Napájení pomocných pohonů ze stejnosměrné troleje z pulzních měničů [30]



Obrázek 41 - Napájení pomocných pohonů ze střídavé troleje z řízených usměrňovačů [30]

Velké využití u pomocných pohonů mají asynchronní motory. Jejich rozměry umožňují přímé vestavění motorů do ventilátorových skříní. Z důvodu menší údržby lze vozidlo vybavit větším počtem menších motorů, které zajistí individuálnější chod chlazení přístrojů. Motory se dle jejich výkonu rozřazují do skupin, které jsou napájeny ze společného střídače. Napájení těchto střídačů je provedeno ze stejnosměrné pomocné sítě.

Pokud se zaměříme na ventilaci stanoviště strojvedoucího nebo prostorů pro

cestující, jsou zde použity klimatizační jednotky či ventilátory s menším výkonem. Ty jsou napájeny přes stykače z vozidlové sítě 3 x 400 V, 50Hz. [30]

## 4.2 Kompresory

Kompresor je důležitou součástí každého kolejového vozidla. Jeho význam je především u mechanického brzdění ovládaného stlačeným vzduchem. Stlačený vzduch se používá pro ovládání elektrických přístrojů (sběrač, stykač, přepojovač), vzduchového odpružení, výsypného mechanismu nákladních vozů, naklápění skříně při průjezdu obloukem, ovládání dveřního mechanismu vozů nebo pro tlakové ovládání jiných drobných pohonů. K výrobě stlačeného vzduchu o tlaku 10 Bar slouží kompresorové soustrojí, obsahující jako pohon elektrický motor. Zásobníkem stlačeného vzduchu jsou na vozidle dva hlavní vzduchojemy zavěšené pod kabinami strojvedoucího. Můžeme se setkat s několika druhy kompresorů, například s pístovým či rotačním. Jako elektromotor byl použit stejnosměrný sériový motor, který dokázal vyvinout velký moment už při nízkých rychlostech. S postupem času se začal využívat asynchronní motor napájený z vlastního měniče, který umožňuje plynulý rozběh změnou kmitočtu. Napájení kompresoru je srovnatelné s napájením ventilátoru, což je zřejmé z *Obrázku 40* a *Obrázku 41*. Kompresory se oproti ventilátorům nezapojují do série, a to z důvodu jejich chtěné nezávislosti. Vozidlo je vybaveno kromě hlavního kompresoru i kompresorem pomocným, který je napájen z baterie vozidla. Tento pomocný kompresor slouží k zajištění tlaku pro provoz přístrojů nutných k připojení lokomotivy k troleji. Dnešní moderní lokomotivy používají třífázové asynchronní motory s kotvou nakrátko, napájené ze střídačů.

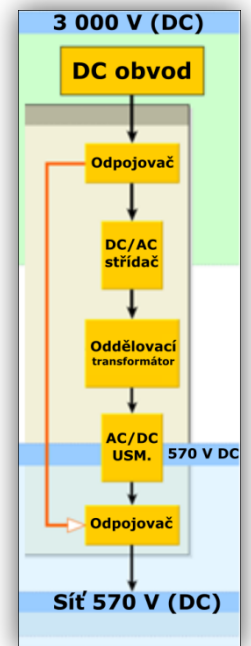
Kromě výše uvedeného použití se kompresory využívají také v klimatizačních jednotkách, u kterých se jedná o speciální provedení. Zde je kompresor s vlastním řízením napájen ze standardní sítě 3 x 400 V, 50 Hz. [30]

## 4.3 Čerpadla

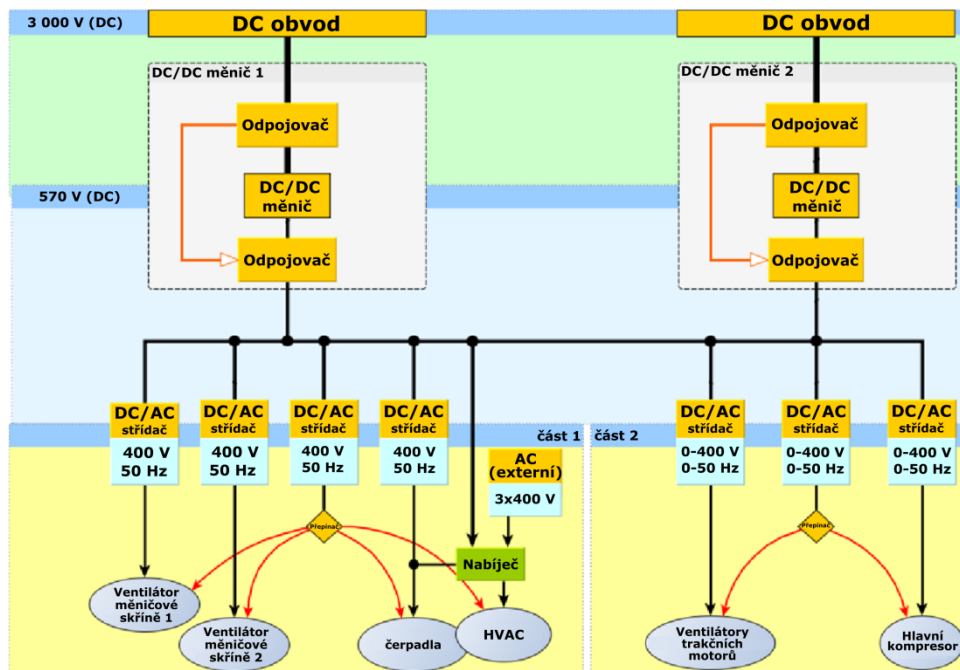
Pro nucený oběh chladicí kapaliny v uzavřené nádobě se využívá funkce čerpadel. Chladicí kapalina zajišťuje přenos tepla z místa vzniku do místa výměníku, který je následně ofukován. Jako pohon čerpadel se využívají jednofázové nebo třífázové motory. U jednofázových motorů čerpadel transformátorového oleje se vyskytovaly problémy při rozběhu za nízkých teplot oleje a nízkém napětí v troleji. Mohlo docházet vlivem velké hustoty oleje a sníženému záběrnému momentu k jejich přehřátí. Z tohoto důvodu se asynchronní motory, které nejsou spouštěny změnou kmitočtu a napětí dostatečně

předimenzovávají. Obvykle jsou výkony čerpadel s porovnáním ostatních pomocných pohonů menší. Proto se mohou používat trvale v provozu bez regulace a tím tedy rovnoměrnému oběhu chladiva. Čerpadla se používají především v trakčních transformátorech. Dnešní lokomotivní transformátory mohou mít dva chladiče umístěné v prostoru nad transformátorem. V okruhu každého chladiče je umístěno čerpadlo, napájené z 3 x 400 V, 50 Hz. [30]

U vícesystémových vozidel je napájení pomocných asynchronních pohonů specifické, odvozené podle provedení trakčních obvodů. Pro vysvětlení lze použít *Obrázek 43*. Koncept napájení se skládá z primární a sekundární části. Primární částí jsou myšleny dva primární DC/DC měniče, které vytváří ze stejnosměrného meziobvodu 3 000 V ss pomocnou síť 570 V ss. Skutečné řešení je ovšem složitější. Primární měnič je složen ze střídače, oddělovacího transformátoru pracujícího na frekvenci 1 600 Hz a usměrňovače. Takovéto složení primárního měniče nám umožňuje galvanické oddělení pomocných pohonů od vysokonapěťové části 3 000 V. Obvykle jsou primární měniče navíc vzájemně zálohovány. Sekundární část pomocných pohonů obsahuje několik střídačů DC/AC, které vytváří z pomocné sítě 570 V ss jednotlivé napěťové podsystémy 3 x 400V o pevné či proměnlivé frekvenci. Z těchto sítí jsou následně napájeny pomocné pohony, například kompresory, ventilátory a čerpadla. [31]



Obrázek 42 - Schématické zapojení primárního měniče [31]

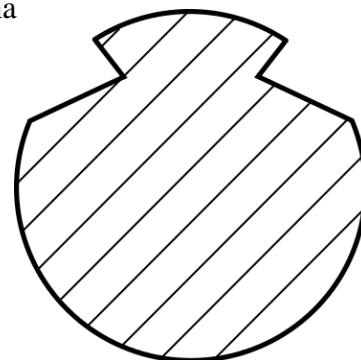


Obrázek 43 - Schéma napájení pomocných pohonů [31]

## 5 Pevná trakční zařízení pro vozidla závislé trakce

Drážní elektrická trakční zařízení lze rozdělit na pevná (stacionární), sloužící k napájení dráhy elektrickou energií a pohyblivá (mobilní), která jsou součástí trakčního vozidla. Mezi pevná trakční zařízení pro vozidla závislé trakce lze začlenit trakční napájecí stanice TNS (trakční transformovny, měnirny), spínací stanice, rozvodny, ale i rozvod trakčního vedení složeného z napáječů, přívodního vedení (trolejové vedení či napájení pomocí třetí kolejnice) a zpětného vedení (skrze kolejnici a zpětné kabely). [32]

Trakční vedení, sloužící k rozvodu elektrické energie a napájení elektrických vozidel, se skládá především z trolejového a zpětného vedení. V praxi se vyskytují dva typy trolejového vedení – prosté a řetězovkové. U prostého vedení je trolejový vodič izolovaně zavěšen přímo na podpěrách. Tento typ trolejového vedení se používá především u vozidel MHD, které nedosahují vysokých rychlostí. Druhým typem je vedení řetězovkové, u kterého je trolejový vodič zavěšen na nosném laně, tvořícím řetězovku. Výška trolejového vodiče se nastavuje pomocí laniček. Tento typ vedení se používá na železnici. Hlavními prvky trolejového vedení jsou trolejový vodič, nosné lano a zesilovací vedení. Trolejový vodič má svůj charakteristický tvar, který vychází z kruhového průřezu vybaveného dvěma postranními výsečemi. Detail průřezu trolejového vodiče je patrný z *Obrázku 44*. Postranní výseče trolejového vodiče slouží k upevnění svorek, držících vodič dostatečně pevně a spolehlivě s tím, aby nezasahovaly do dráhy sběrače vozidla. Trolejový vodič se ve většině případů vyrábí z mědi. Jedná se o čistou měď nebo měď doplněnou o příměsi stříbra, kadmia nebo hořčíku. Takovéto složení slouží ke zvětšení pevnosti a odolnosti před opotřebením. V závislosti na trakční napájecí soustavě a předpokládaném proudovém zatížení tratě se následně volí velikost průřezu trolejového drátu – od 50 mm<sup>2</sup> do 150 mm<sup>2</sup>. U střídavého napájecího systému bývá průřez trolejového vodiče menší než u systému stejnosměrného.



*Obrázek 44 - Průřez trolejového vodiče*

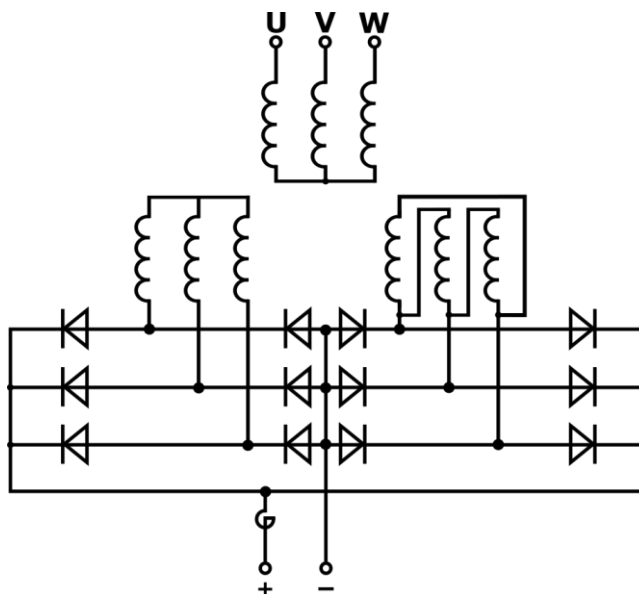
Zpětné vedení trakčního proudu je provedeno prostřednictvím kolejnic, ze kterých se následně z nejbližšího místa k napájecí stanici odvádí proud skrze zpětné kabely. U stejnosměrné soustavy lze pro zvýšení vodivosti použít kolejové propojky. Ty lze umísťovat pouze v místech, kde se nevyskytují kolejové a zabezpečovací obvody. [32], [36], [38]

Prostřednictvím trakčních napájecích stanic (TNS) se zabezpečuje napájení trakčního vedení požadovaným druhem proudu a požadované hodnotě napětí. TNS tedy mají za úkol upravit elektrickou energii odebíranou z distribuční energetické sítě 110 kV nebo 22 kV (popřípadě 35 kV) a transformovat ji na požadovanou hodnotu pro napájení daného úseku trakčního vedení. Z kapitoly **1.2 Trakční napájecí systém** víme, že v České republice jsou na železnici čtyři základní úrovně trakčního napájení. Jedná se o stejnosměrné napětí 1,5 kV a 3 kV a střídavé napětí 25 kV, 50 Hz a 15 kV, 16,7 Hz. Pro vysvětlení se zaměříme na hlavní železniční soustavy 3 kV stejnosměrných a 25 kV, 50 Hz střídavých.

Trakční napájecí stanice jsou pro oba napájecí systémy rozdílné. Pro napájení stejnosměrné proudové soustavy se používají trakční měnirny (TM), pro napájení střídavé jednofázové proudové soustavy se využívají trakční transformovny (TT). Na styku obou napájecích soustav se zřizují tzv. kombinované napájecí stanice, které umožňují napájet obě trakční proudové soustavy. V úsecích mezi trakčními napájecími stanicemi se záměrně zřizují tzv. spínací stanice (ST). Tyto spínací stanice jsou zde z několika důvodů, například zvyšují spolehlivost napájení elektrizovaných tratí či výkonnost pevných trakčních zařízení a také oddělují samostatné úseky trakčního vedení. Svoji funkcí umožňují snižovat energetické ztráty a úbytky napětí na trakčním vedení. [32], [33]

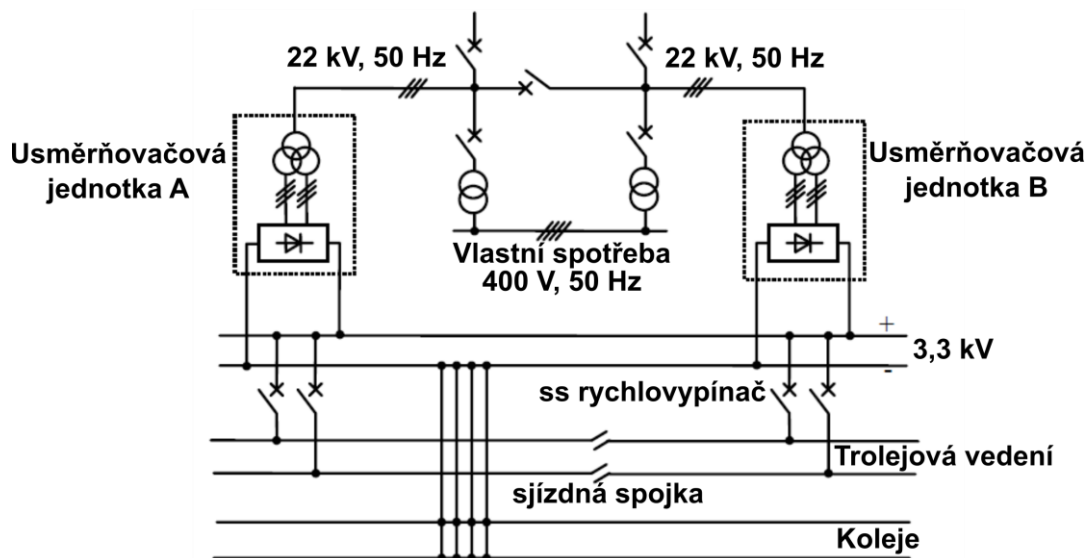
## 5.1 Trakční měnirny (TM)

Trakční měnirna (TM) slouží k přeměně třífázové energetické soustavy na soustavu stejnosměrnou o požadované hodnotě napětí. K rozvodu třífázové soustavy do trakčních měniren se na českých drahách používá nadřazená třífázová soustava 110 kV a 22 kV. K transformaci elektrické energie se využívá jedno (110 kV / 3 kV) či dvoustupňová (110 kV / 22 kV a následně 22 kV / 3kV) transformace. Vzdálenost trakčních měniren se pohybuje v rozmezí 20 až 25 km. Základními prvky jsou trakční transformátor a trakční usměrňovač. Společně vytvářejí usměrňovačovou jednotku, kterých je v trakční měnirně několik. Dříve se pro usměrnění používaly rtuťové usměrňovače (ignitrony), od kterých se přešlo k dnešním křemíkovým diodovým můstkům, využívajících dvanácti pulzní usměrnění. Toho je docíleno paralelním spojením dvou třífázových můstků. Principiální zapojení je na *Obrázku 45*. [16], [33]



Obrázek 45 - Schéma usměrňovačové jednotky 3 kV [16]

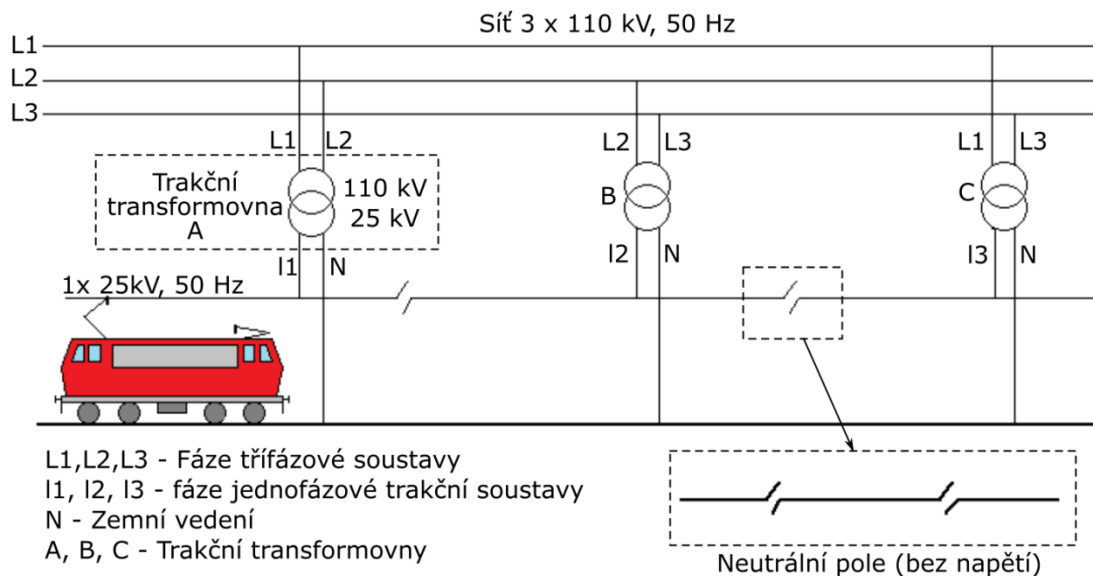
Jednotlivé kolejové úseky lze napájet jednostranně, oboustranně nebo také čtyřstranně s využitím spínací stanice. Na následujícím obrázku je zjednodušené schéma trakční měřírny, která napájí dvoukolejnou trať. Jmenovité výkony trakčních měníren se pohybují v rozsahu od 5 do 20 MW. Jmenovitá hodnota napětí trolejového vedení je normou daná 3 kV, avšak měnírny pracují s vyšší hodnotou napětí, a to se zvýšeným napětím 3,3 kV z důvodu možných úbytků na vedení. [34]



Obrázek 46 - Zjednodušené schéma trakční měřírny [34]

## 5.2 Trakční transformovny (TT)

Napájení jednofázové trakční proudové soustavy 25kV, 50 Hz se provádí prostřednictvím trakčních transformoven (TT) jednoduchou transformací napětí z energetické třífázové sítě vvn průmyslového kmitočtu 50 Hz. Vysoká hodnota napětí trolejového vedení umožňuje umístění trakčních transformoven na vzdálenosti větších než 50 km od sebe. V porovnání s trakčními měniřmi jsou tyto vzdálenosti přinejmenším dvojnásobné (TM: 20 km, TT: 50 km). K transformaci se využívají 1-fázové trakční transformátory, u kterých se svorky primárního vinutí připojují mezi dvě fáze třífázové energetické soustavy vvn 110 kV, 50 Hz. Výstup ze sekundárního vinutí trakčního transformátoru je následně připojen jedním vodičem na trakční vedení a druhým vodičem spojen s kolejemi, které vytváří zemní vedení. Tím, že se jedná o 1-fázovou soustavu napájenou z třífázové energetické soustavy, nastává problém v nesymetrickém odběru a tím i nerovnoměrném zatěžování energetické nadřazené sítě. Proto jsou na jednofázový odběr kladeny velmi přísné požadavky ze strany energetiky. Pro zlepšení nesymetrického zatížení 3-f energetické soustavy se provádí tzv. prostřídávání fází, ze kterých se trakční transformátory napájí. Takovéto napájení je možné vidět na *Obrázku 47*.

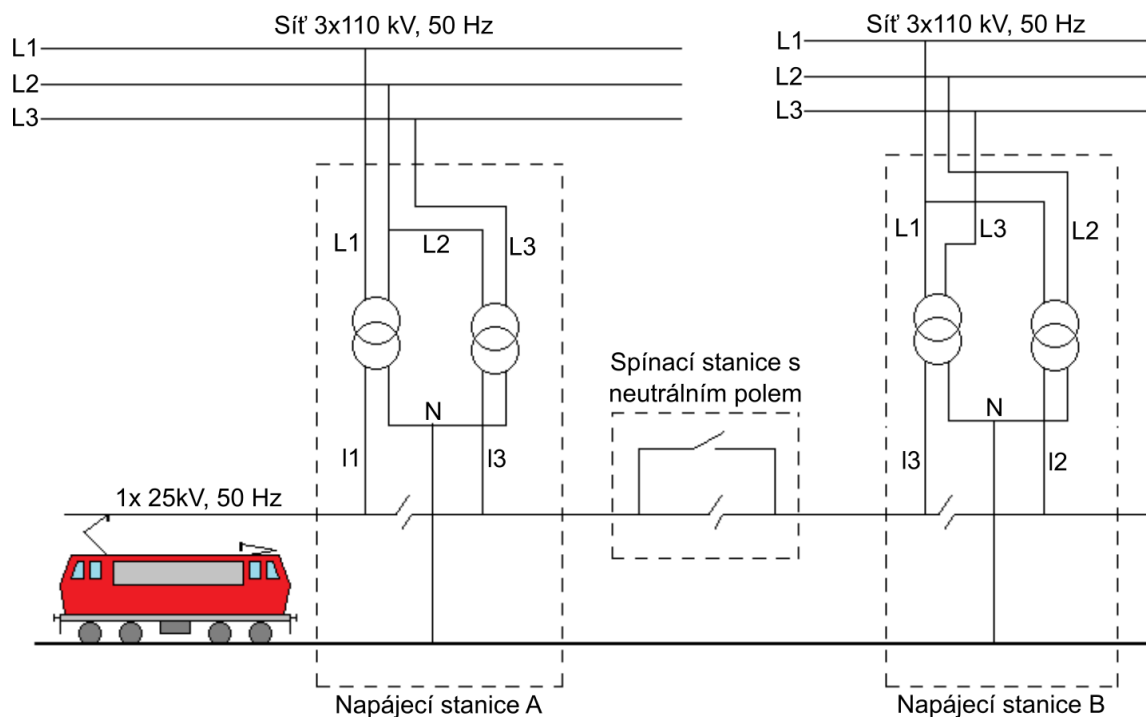


Obrázek 47 - Principiální schéma napájení (typ T) 1-f trakční soustavy 25 kV, 50 Hz [39]

Prostřídáváním fází však vzniká fázový posun napětí ( $120^\circ$ ) sousedních traťových úseků, a tím i k rozdílu napětí vůči sobě. Z tohoto důvodu je nezbytně nutné elektrické oddělení napájecích úseků, které se provádí vloženými neutrálními poli. Pokud by se tak neučinilo, došlo by k mezifázovému zkratu. Na železnici jsou neutrální pole znázorněna návěstmi *vypni/zapni proud*. Jednofázová trakční soustava je napájena jednostranně.

Oboustranné napájení by přinášelo problémy, které by zapříčinily tranzit energie v nadřazené energetické soustavě. V praktickém provedení se objevují dva základní typy napájení trakčního vedení. První typ (T) prezentuje *Obrázek 47*. Zde je trakční transformátor umístěn uprostřed napájeného úseku. Napájené úseky mohou také obsahovat spínací stanice. Obvykle je typ napájení T nasazován na málo využívaných nebo koncových úsecích. Pro nasazení na více využívaných tratích musí trakční transformovna obsahovat dva transformátory, které fungují na principu vzájemného zálohování.

Obvykle se používá druhý typ napájení, a to typu V. Tento typ principiálně představuje *Obrázek 48*. Napájecí stanice obsahuje dva trakční transformátory, které jsou také napájeny prostřednictvím prostřídáných fází. Mezi napájecími stanicemi jsou vloženy spínací stanice a neutrální pole. V případě poruchy napájecí stanice lze její výkon rozdělit mezi dvě sousední napájecí stanice. [32], [36], [37]



*Obrázek 48 - Principiální schéma napájení (typ V) 1-f trakční soustavy 25 kV, 50 Hz [39]*



## 6 Závěr

Elektrická trakce je velmi rozsáhlé téma, obsahující mnoho různých odvětví. Do této problematiky lze zařadit každé vozidlo, které je poháněno pomocí elektromotoru. Hlavní skupinu tvoří vozidla městské hromadné dopravy a železnice. Podle způsobu přivedení energie se dále vozidla dělí na závislou a nezávislou trakci. Od roku 1879, kdy Werner von Siemens představil první elektrický vlak, prošel obor elektrické trakce velkým vývojem, zaměřeným na trakční napájecí soustavy, výkonovou elektroniku i samotná vozidla.

Téma diplomové práce jsem zvolil dle studovaného oboru, zaměřeného na elektrickou trakci. Svoji tvorbou jsem přispěl k rozšíření internetového výukového portálu EDUCON o zajímavou problematiku týkající se elektrické trakce. Průběh vytváření diplomové práce lze rozdělit do čtyř hlavních bodů, podle kterých jsem postupoval.

V prvé řadě bylo nutné nastudování odborné literatury s následným výběrem užitečných textů a informací, sloužících pro vytvoření obsahu diplomové práce. Citované materiály jsem uvedl v seznamu literatury a informačních zdrojů na konci práce. Při výskytu nejasností jsem se obracel na odborníky z daného oboru, kteří mi vždy předali cenné informace. Za to jim patří velké poděkování.

Po vytvoření teoretické části jsem se následně zabýval vizualizacemi, které umožňují čtenáři postupný přechod mezi jednotlivými fázemi. Tyto vizualizace jsou zaměřeny na pohyb pracovního bodu v poli trakčních charakteristik u stupňové a plynulé regulace. Další vizualizace je zaměřena na problematiku cílového brzdění. Zde jsem se zaměřil na vysvětlení funkce a principu tohoto systému. Pro kontrolu výsledných průběhů jsem použil skript vytvořený v programu Matlab.

Časově nejnáročnější byla samotná tvorba zdrojového kódu webových stránek. Z důvodu velkého počtu textů a obrázků jsem zvolil variantu s použitím kaskádových stylů CSS, které umožňují přednastavení a následnou manipulaci s vlastními vytvořenými styly.

Po vytvoření části, týkající se internetového výukového portálu, jsem pokračoval s dokončením psané verze diplomové práce. Z důvodu zachování obsahu vytvořené elektronické části jsem se rozhodl k variantě, u které se obsah diplomové práce shoduje s obsahem internetového výukového portálu.

Diplomovou práci jsem rozčlenil do pěti základních kapitol. V první kapitole se zabývám rozdělením elektrické trakce. Jsou zde popsány typy vozidel, rozchody kolejí, trakční napájecí systémy či používané druhy elektrických pohonů. Druhá část diplomové práce je věnována problematice trakční mechaniky a trakčním charakteristikám vozidel. Prostřednictvím obrázků a vizualizací jsem popsal stupňovou a plynulou regulaci výkonu hnacích vozidel. Ve třetí kapitole jsou popsány druhy brzdových zařízení a princip cílového brzdění. Tento způsob navedení soupravy na sníženou či nulovou rychlost je částečně nasazen i na úsecích českých železnic. Čtvrtou kapitolou popisují ostatní pohony, které se nevyužívají k přímému pohonu vozidel. Jedná se o pomocné pohony, ve kterých jsou obsaženy pohony ventilátorů, kompresorů a čerpadel. V této kapitole jsem vysvětlil starší i současné typy napájení těchto pohonů. Nezbytnou součástí závislé elektrické trakce jsou pevná trakční zařízení, popsaná v poslední, páté kapitole. Nastínil jsem zde varianty napájení stejnosměrné i střídavé elektrické trakce.

Dle mého názoru může internetový výukový portál EDUCON poskytnout čtenáři dostatečný přísun informací, sloužících k získání základních znalostí z dané problematiky. Do budoucnosti lze uvažovat o dalším rozšíření tohoto výukového portálu v rámci bakalářských či diplomových prací.

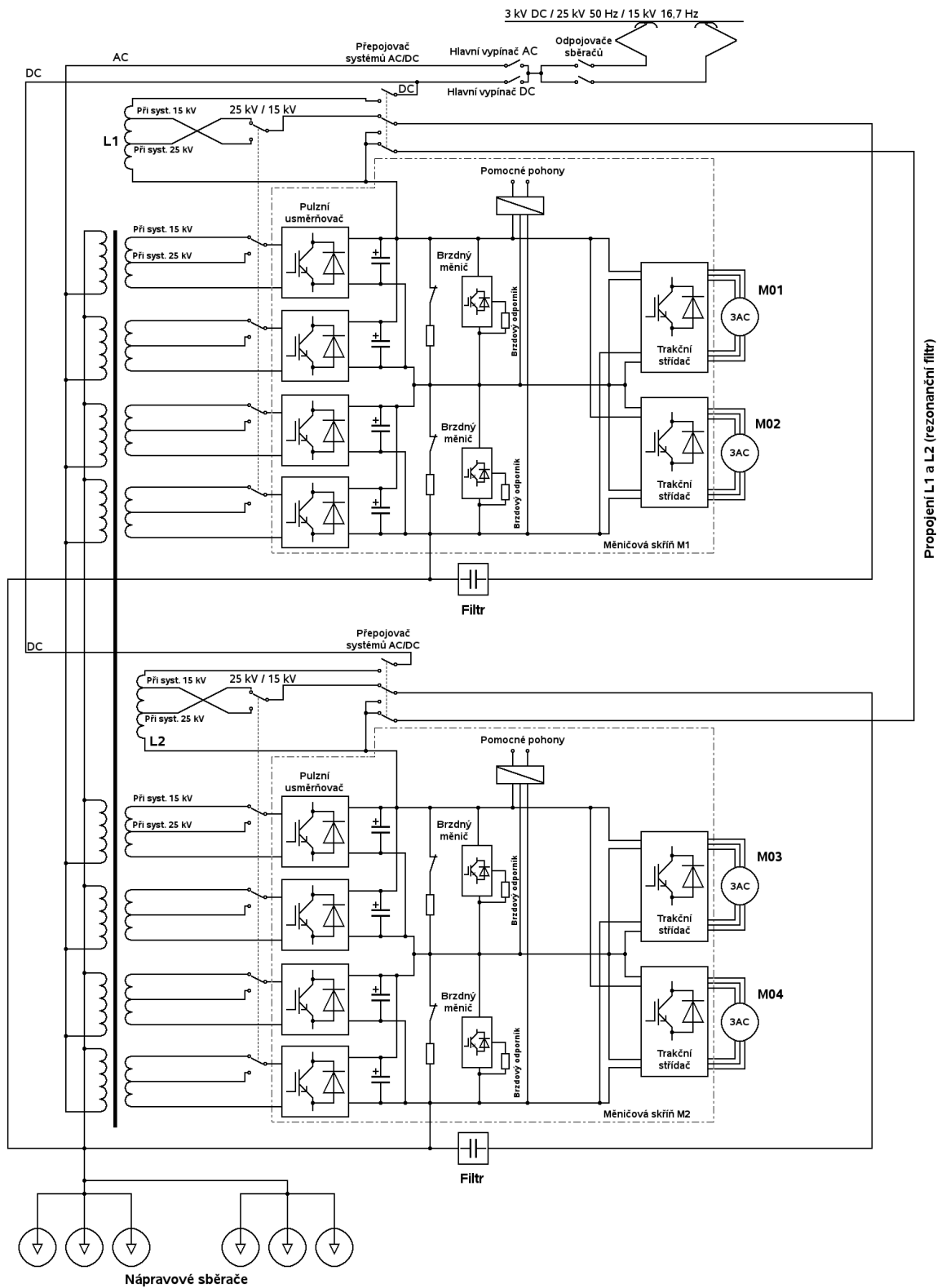
## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] JANSA, František. *Elektrická trakcia*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1976-, v.
- [2] TALAFOUS, Luboš. *Pohony pro elektrickou trakci*. Plzeň, 2013. bakalářská práce (Bc.). ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. Fakulta elektrotechnická
- [3] Rozchod koleje [online]. [cit. 2015-02-11]. Dostupné z: <http://railwaymodel.blog.bg/hobi/2013/06/13/jelezopytnata-istoriia-na-evropa.1119779>
- [4] *Elektrická trakce v městské hromadné dopravě včera, dnes (a zítra)*. [online]. [cit. 2015-02-11]. Dostupné z: <http://www.turistika.cz/rady/elektricka-trakce-v-mestske-hromadne-doprave-vcera-dnes-a-zitra>
- [5] *Pneumatic braking system*, Railway Technical Web Pages (1998) [online]. [cit. 2015-02-11]. Dostupné z: <http://www.railway-technical.com>
- [6] *Tramvajová doprava*. In: [online]. [cit. 2015-02-11]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Tramvajová\\_doprava](http://cs.wikipedia.org/wiki/Tramvajová_doprava)
- [7] DANZER, Jiří. *Elektrická trakce*. Vyd. 1. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2009, 77 s. ISBN 978-80-7043-769-8.
- [8] *Pražské metro* [online]. [cit. 2015-02-16]. Dostupné z: <http://www.honzikovyvlacky.cz/2011/11/27/prazske-metro-nejsou-jenom-tunely-a-stance/comment-page-1>
- [9] *Lokomotiva* [online]. [cit. 2015-02-16]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Lokomotiva>
- [10] *Železničář*. In: [online]. [cit. 2015-02-16]. Dostupné z: <https://zeleznicar.cd.cz/zeleznicar/historie/devadesat-let-provozu-berlinske-mestske-rychlodrahy/-/5428/>
- [11] Úřední věstník Evropské unie. *Mezinárodní předpisy pro interoperabilitu železničních systémů (2002/735/ES)*, [cit. 2015-02-18].
- [12] *Železniční napájecí soustava*. In: [online]. [cit. 2015-02-18]. Dostupné z: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Europe\\_rail\\_electrification.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Europe_rail_electrification.png)
- [13] *Železniční mapy ČR* [online]. [cit. 2015-02-18]. Dostupné z: <http://www.szdc.cz/onas/zeleznicni-mapy-cr.html>
- [14] *Koncepce vozidel elektrické vozby*. In: [online]. [cit. 2015-02-18]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~s1i95/phv/Koncepce%20vozidel%20elektrické%20vozby.pdf>
- [15] JANSA, František. *Dynamika a energetika elektrické trakce*. 1. vyd. Praha: NADAS, 1980. ISBN 80-7194-768-7.
- [16] Výpis z přednášek předmětu-Pevná trakční zařízení, Doc. Ing. Lucie Noháčová, Ph.D., ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. Fakulta elektrotechnická
- [17] ŠIROKÝ, Jaromír. Skriptum: *Mechanika v dopravě I - kolejová vozidla*. Ostrava, 2003 Dostupné z: [http://homen.vsb.cz/~s1i95/mvd/Skr\\_MvD.pdf](http://homen.vsb.cz/~s1i95/mvd/Skr_MvD.pdf)
- [18] Výpis z přednášek předmětu - Řízení a regulace vozidel, Ing. Jaroslav Škubal, Ph.D., ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. Fakulta elektrotechnická
- [19] DIÁK, Martin. *Brzdy vozidel pro vysoké rychlosti*. Pardubice, 2008. diplomová práce (Ing.). UNIVERZITA PARDUBICE. Dopravní fakulta Jana Pernera
- [20] DANZER, Jiří. *Elektrická trakce III*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2003. ISBN 80-7082-945-1.
- [21] *Vířivá brzda ICE-S*. In: [online]. [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:WB\\_ICE-S.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:WB_ICE-S.jpg)
- [22] *Mechanické brzdy*. In: [online]. [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: <http://www.vagony.cz>

- [23] *Technické detaily motorové jednotky 814+914*. In: [online]. [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: <http://www.regionovy.cz/clanky/interier/zdrze.jpg>
- [24] *Brzdová výzbroj 109e*. In: [online]. [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: <http://109-e.wgz.cz/rubriky/popis-lokomotivy-109-e/brzdova-vystroj/fotografie-brzdove-vyzbroje>
- [25] *Kotoučová brzda*. In: [online]. [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Kotoučová\\_brzda](http://cs.wikipedia.org/wiki/Kotoučová_brzda)
- [26] *Kolejnicové brzdy*. In: [online]. [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: <http://www.alfaunion.cz/produkty-kolejnicove-brzdy-detail-15>
- [27] *Vlaková souprava Siemens Desiro*. In: [online]. [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: <http://technet.idnes.cz/v-praze-byl-predstaven-novy-vlak-jezdit-bude-zrejme-od-prosince-pss>
- [28] *Dopravní řád drah - §37, 173/1995 Sb. Brzdění a rychlost jízdy vlaku*. In: [online]. [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: <http://portal.gov.cz/app/zakony/>
- [29] HELLER, Petr. *Brzda v kolejových vozidlech*. Prezentace PDF – Katedra konstruování strojů, Plzeň: 2010. [cit. 2015-03-22]
- [30] DANZER, Jiří. *Elektrická trakce II*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, Elektrotechnická fakulta, 2001, 74, 49, 49 s. ISBN 80-708-2814-5.
- [31] Pracovní materiály Škoda Transportation a.s.
- [32] JANSÁ, František. *Elektrická vozba a elektrické trakčné zariadenie na železničiaciach*. Bratislava: Alfa, 1972.
- [33] Pracovní materiály – Emailová komunikace Ing. Tomáš Drvota, Správa železniční dopravní cesty SŽDC
- [34] KOLÁŘ, Václav. *Měření a simulace zatížení trakčních měnících a vyhodnocení jejich činnosti*. In: [online]. [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: [http://www.cs.vsb.cz/arg/worconf/wofex/2003/paper/p2645/elektroenergetika/kolar\\_vaclav.pdf](http://www.cs.vsb.cz/arg/worconf/wofex/2003/paper/p2645/elektroenergetika/kolar_vaclav.pdf)
- [35] *Lokomotiva S499.02 (73E), řada 242* In: [online]. [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Lokomotiva\\_242](http://cs.wikipedia.org/wiki/Lokomotiva_242)
- [36] LANÁKOVÁ, Gabriela a Dalibor ŠINDLER. *Napájanie elektrických dráh*. Bratislava: Alfa, 1989, 205 s. 1.vyd.
- [37] PALEČEK, Josef. *Napájení jednofázové vozby Českých drah z hlediska elektromagnetické kompatibility*. Vyd. 1. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2000, 98 s. ISBN 80-707-8791-0.
- [38] *Zpravodaj železnice, SŽDC-Správa železniční dopravní cesty, březen 2011*, In: [online]. [cit. 2015-04-09]. Dostupné z: <http://www.szdc.cz/o-nas/casopisy/zeleznice-1101.pdf>
- [39] *Střídavá trakční soustava, K-Report: Český dopravní server*, [online]. [cit. 2015-04-09], Dostupné z: <http://www.k-report.net/clanky/stahovacky-prezitek-nebo-nutnost>
- [40] JANSÁ, František. *Vozidla elektrické trakce*. 2. vyd. Praha: NADAS, 1987, 400 s. ISBN 31-069-87.
- [41] DANZER, Jiří. *Elektrická trakce: Plynulá regulace cize buzeného motoru*. Vyd. 1. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2009, 101 s. ISBN 978-80-7043-771-1.
- [42] MYSLIVEC, Ivo a Aleš LIESKOVSKÝ. 10 let AVV na tratích ČD. *Železniční magazín Panorama*. 2003 [cit. 2015-04-27].
- [43] MYSLIVEC, Ivo. Autopilot strojvedoucích ještě neřekl své poslední slovo. In: *Magazín Železničář*. 2014 [cit. 2015-04-27].
- [44] BINGO, Marek. Automatické vedení vlaku na síti SŽDC. In: *Moderní železnice*. 2014 [cit. 2015-04-27].



Příloha 2 – Blokové schéma lokomotivy 109E [31]



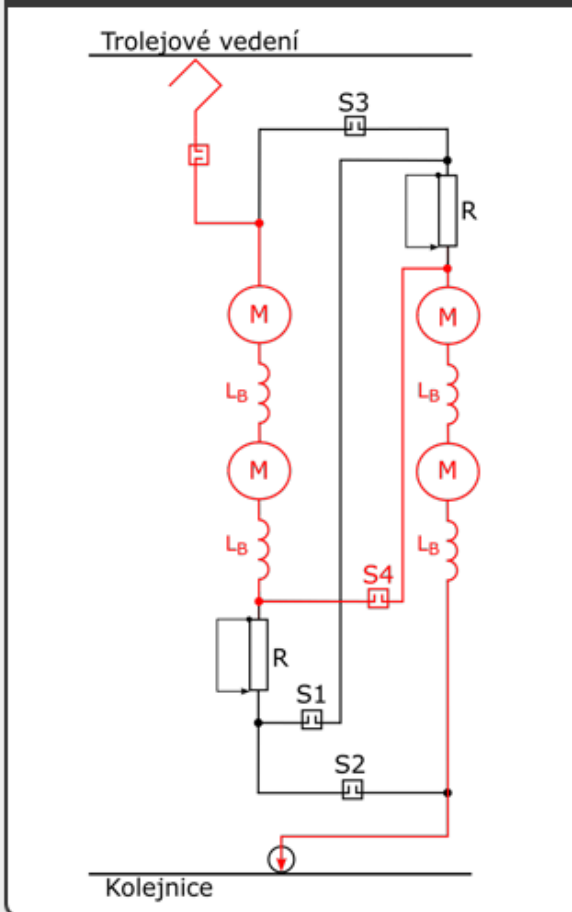
Blokové schéma lokomotivy 109 E



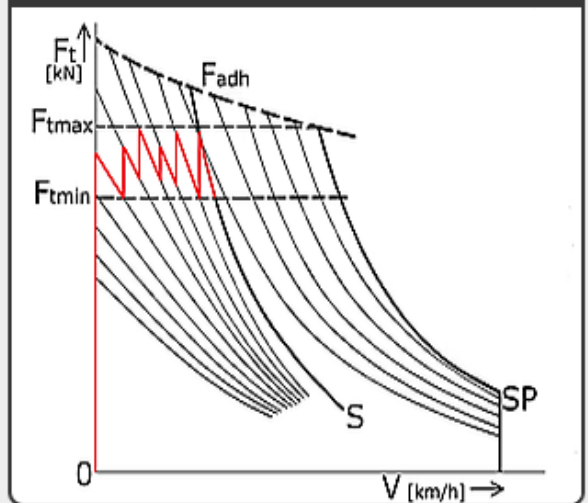
Příloha 3 - Vizualizace stupňové odporové regulace

# Stupňová odporová regulace

## Schematické zapojení



## Trakční charakteristika



## Spínací diagram

Prvek	Číslo úrovně														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
S1	x	x	x	x	x	x	x								
S2										x	x	x	x	x	x
S3										x	x	x	x	x	x
S4							x	x	x	x					
R	+	+	+	↓	↓	-	-	-	+	+	+	↓	↓	-	-



Vypnutí stykače S1. Svorkové napětí trakčního motoru je rovno 750 V. Pracovní bod trakční charakteristiky se nachází na prvním hospodárném stupni, označeném písmenem S – sériové spojení motorových skupin.

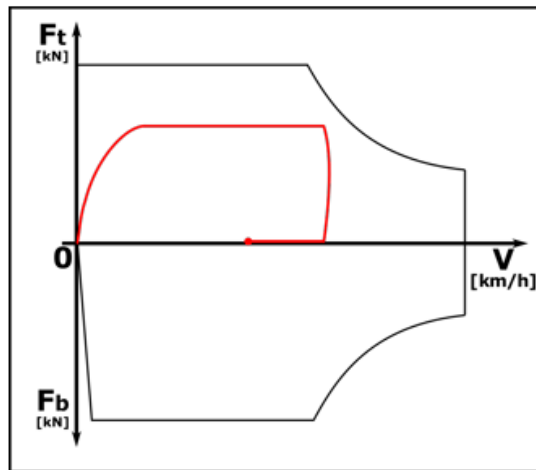
**STYKAČ : S1, S2, S3, S4**  
**X : Sepnutý stykač**  
**ODPORNÍK : R**  
**+** : Plně zařazený R  
**↓** : Snižování R  
**-** : Vyřazený R

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15

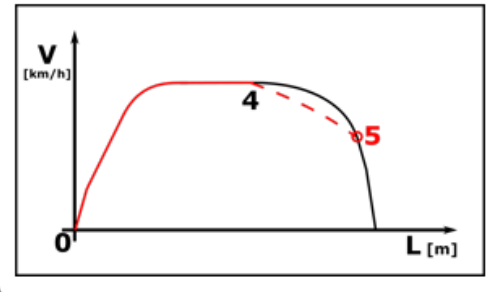
Příloha 4 – Vizualizace plynulé regulace

## Plynulá regulace

Trakční a brzdová charakteristika



Hodogram



Druhou a ekonomičtější variantou je jízda výběhem. Tažná i brzdná síla je nulová. Průběh rychlosti vlakové soupravy ovlivňují pouze jízdni a traťové odpory. Pokud by na trati bylo klesání, rychlost by se mohla zvyšovat. Tento případ neuvažujeme.



- 0
  1
  2
  3
  4
  5
  6
  7
  8
  9



Příloha 5 - Vizualizace cílového brzdění

## Cílové brzdění

### Trakční a brzdová charakteristika

0

V [km/h]

### Tachogram

v [km/h]

t [min]

Navýšením rychlosti se zkrátí doba jízdy. Stav brzdění je nutný započít dříve.

←

→

zvýšení tažné síly

snížení tažné síly

zvýšení rychlosti

snížení rychlosti

0
1
2
3
4

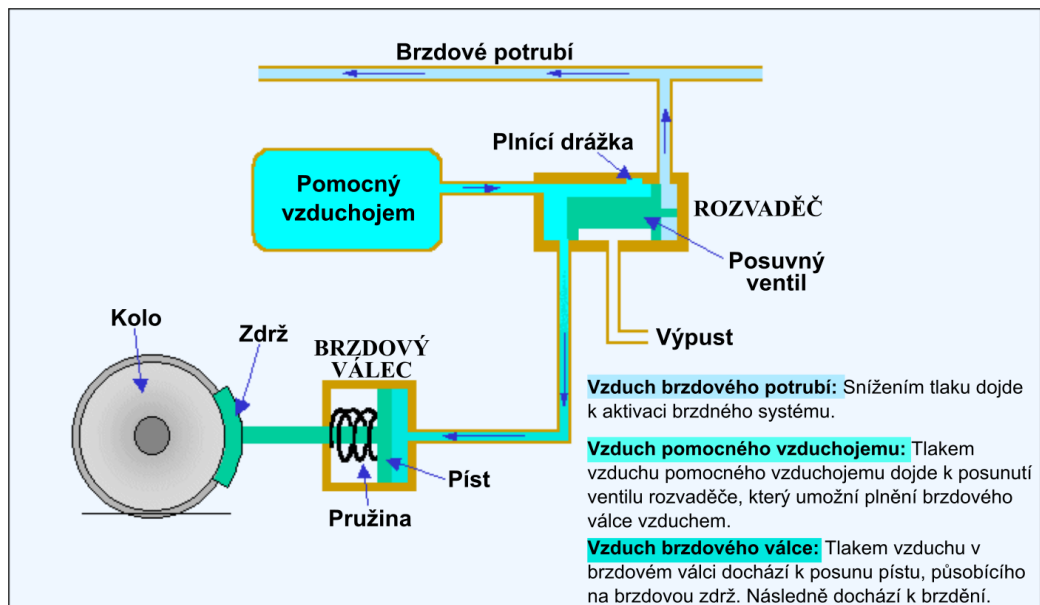
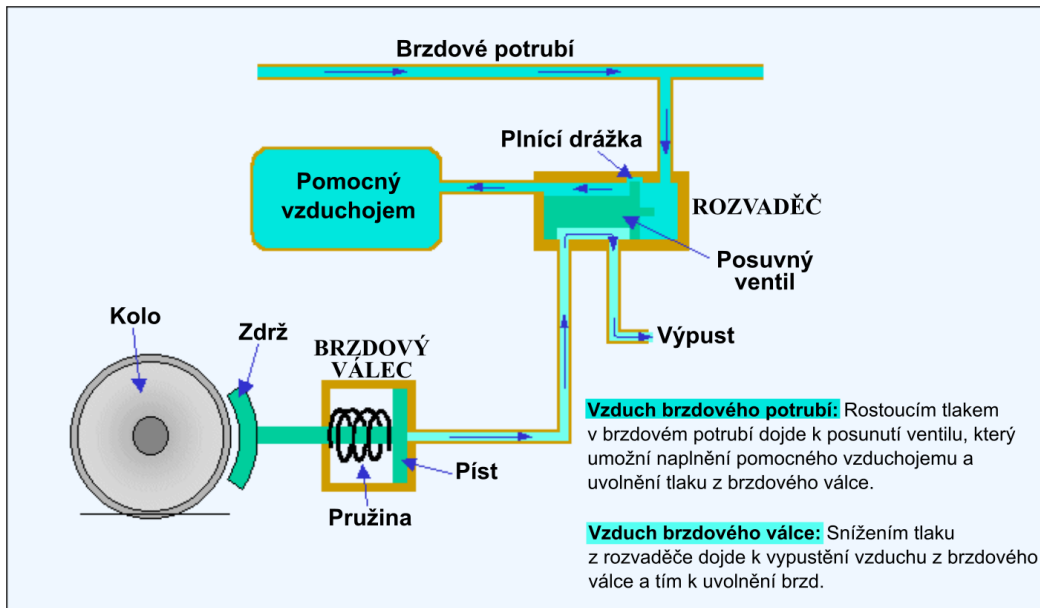
### Hodogram

v [km/h]

L [m]

Křivka cílového brzdění

Příloha 6 - Popis funkce rozvaděče (Odbrzdění; Zabrzdění) [5]



Příloha 7 - Popis schématických značek

Vysvětlení schématických značek z Obrázků pomocných pohonů				
Značka	Název		Značka	Název
	Vypínací prvek (GTO tyristor)			Budící vinutí
	Polovodičová dioda			Nápravový sběrač
	Tyristor			Sběrač
	Kondenzátor			Kompresor
	Tlumivka			Ventilátor