

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra elektrotechniky a automatizace



**Druhy elektrických napájecích soustav
v dopravě**

Bakalářská práce

Autor bakalářské práce: Filip Novák

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Viktor Novák

© 2019 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Filip Novák

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Druhy elektrických napájecích soustav v dopravě

Název anglicky

Transport electrification systems

Cíle práce

Cílem práce je charakterizovat jednotlivé elektrické napájecí soustavy užívané v dopravě v rámci Evropy, včetně detailnějšího popisu napájecích soustav užívaných v České republice.

Metodika

Vypracovat rešerši obsahující ucelený přehled jednotlivých elektrických napájecích soustav v dopravě (vlakové, tramvajové, trolejbusové a podzemní) užívaných v Evropě s detailnějším zaměřením na Českou republiku. Stručně charakterizovat příslušné napájecí systémy a popsat jejich klíčové vlastnosti, výhody a nevýhody.

Doporučený rozsah práce

30-40

Klíčová slova

doprava, elektrická energie, napájecí soustava

Doporučené zdroje informací

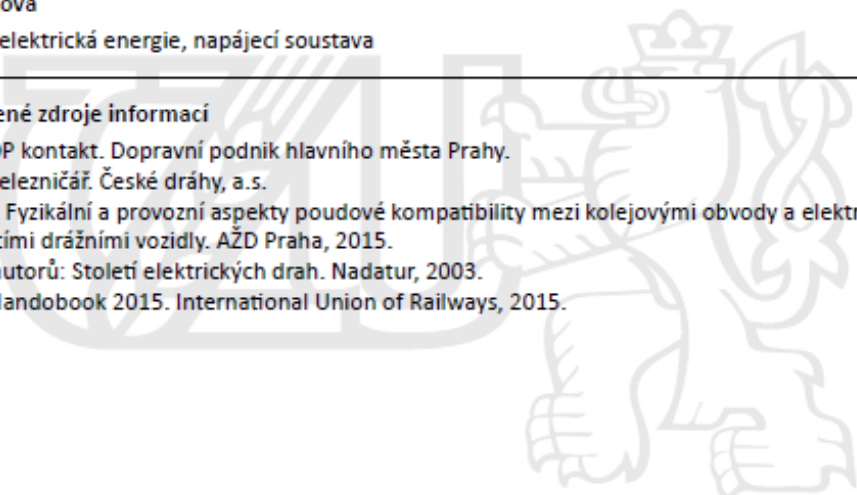
Časopis DP kontakt. Dopravní podnik hlavního města Prahy.

Časopis Železničář. České dráhy, a.s.

Faran, A.: Fyzikální a provozní aspekty poudové kompatibility mezi kolejovými obvody a elektrickými hnacími drážními vozidly. AŽD Praha, 2015.

Kolektiv autorů: Století elektrických drah. Nadatur, 2003.

Railway Handbook 2015. International Union of Railways, 2015.



Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Viktor Novák

Garantující pracoviště

Katedra elektrotechniky a automatizace

Elektronicky schváleno dne 2. 2. 2018

prof. Ing. Jaromír Volf, DrSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 9. 3. 2018

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 10. 10. 2018

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: "Druhy elektrických napájecích soustav v dopravě" vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V Praze dne 30.3.2019

Filip Novák

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Viktoru Novákovi za jeho trpělivost, laskavost a odborné konzultace při psaní mé bakalářské práce.

Druhy elektrických napájecích soustav v dopravě

Souhrn

Práce pojednává o přehledu využívaných napájecích soustav v železniční a elektrifikované městské dopravě. V první části se studie věnuje historickému vývoji elektrických drah a základnímu rozdělení elektrických hnacích vozidel.

V dalších částech se práce zabývá základními informacemi, výhodami a nevýhodami používaných systémů. Následně charakterizuje používané pohony v trakci a řešení styku různých napájecích soustav.

Poslední část ukazuje procentuální zastoupení elektrifikovaných tratí v Evropě. V železniční dopravě přes poloviční většinu tratí napájí střídavé soustavy, které mají velké výhody v menších ztrátách ve vedení, jež jsou následně dokázány výpočty. Ukazují, proč se čím dál více využívá tento typ napájení.

Závěr práce shrnuje výhody elektrifikace tratí střídavým systémem. I na našem území je v plánu přepínání stejnosměrných tratí právě na střídavé s návazností na plánované vysokorychlostní tratě.

Klíčová slova: doprava, elektrická trakce, elektrická energie, napájecí soustava

Transport electrification systems

Summary

The thesis is an overview of currently used railway electrification systems in electrified railway trains and vehicles used in public transportation.

In the first section the study discusses historical evolution of electrified railways and the basic categorisation of locomotives.

The next chapters examine baseline information and advantages and disadvantages of using these systems, subsequently characterising used propulsions in traction and solutions to contact surfaces of different railway electrification systems.

The last chapter shows the percentage of electrified railways in Europe. Alternating systems supply over half of all electrified European tracks in railway transportation due to big advantages of smaller losses in conduction. These advantages are then supported by calculations which show why this kind of energy supply is being used increasingly.

A summary of advantages of electrified tracks with alternating systems is drawn in the conclusion. There are plans of switching direct tracks to alternating in the Czech Republic as a follow-up of planned high-speed trails.

Keywords: transport, electric traction, electric power, power supply system

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Cíl práce	2
3	Elektrické dráhy	3
3.1	Historický vývoj elektrických tratí	3
3.1.1	Vývoj v Evropě	3
3.1.2	Vývoj v USA.....	4
3.1.3	Vývoj v České republice	4
3.2	Charakteristiky elektrických hnacích vozidel	5
3.3	Rozdělení železničních elektrických hnacích vozidel	6
4	Napájecí systémy na železnicích.....	8
4.1	DC 750 V	8
4.1.1	Výhody, nevýhody	8
4.2	DC 1,5 kV	9
4.2.1	Výhody, nevýhody	10
4.3	DC 3 kV	10
4.3.1	Trakční měnírny	10
4.3.2	Výhody, nevýhody	11
4.4	AC 15 kV, 16 2/3 Hz	12
4.4.1	Výhody, nevýhody	13
4.5	AC 25 kV, 50 Hz	13
4.5.1	Rekuperace	14
4.5.2	Trakční transformovny	15
4.5.3	Výhody, nevýhody	17
4.6	2 AC 25 kV, 50 Hz	17
4.6.1	Výhody, nevýhody	18
5	Napájecí systémy pro MHD	19
5.1	Metro.....	19
5.1.1	Vznik a vývoj	19
5.1.2	Napájecí kolejnice	20
5.1.3	Napájecí měnírna pro pražské metro.....	20
5.2	Tramvaje	20
5.2.1	Vývoj na našem území	20
5.2.2	Napájení	21
5.2.3	Trolejové vedení.....	22
5.3	Trolejbusy	23
5.3.1	Druhý trolejbusový systém	23

6	Používané pohony v trakci	25
6.1	Stejnoseměrný sériový motor	25
6.2	Stejnoseměrný motor cize buzený.....	27
6.3	Asynchronní motory	28
6.4	Synchronní motory	29
7	Řešení styku více napájecích systémů	30
7.1	Styk odlišných trakčních elektrických soustav	30
7.2	Dvousystémové lokomotivy Českých drah	31
7.2.1	Stejnoseměrná výzbroj	31
7.2.2	Střídavá výzbroj	32
8	Přehled napájecích systémů v Evropě a v České republice.....	34
8.1	Přehled elektrifikace v České republice	36
8.1.1	Budoucnost elektrifikace železnic v ČR	38
8.2	Výpočet ztrát	40
8.2.1	Výpočet pro stejnou vzdálenost 10 km	40
8.2.2	Výpočet pro průměrnou vzdálenost 10 a 25 km	42
9	Závěr.....	43
10	Literatura	44
11	Seznam obrázků	48

Seznam zkratek

- 1) AC – alternating current – střídavý proud
- 2) ČD – České dráhy, akciová společnost
- 3) ČSD – Československé státní dráhy
- 4) DC – direct current – stejnosměrný proud
- 5) DPP – Dopravní podnik hl.m. Prahy, akciová společnost
- 6) PMSM – permanent magnet synchronous motor – synchronní motor s permanentním magnetem
- 7) SŽDC – Správa železniční dopravní cesty, státní organizace
- 8) TGV – Train à Grande Vitesse – vysokorychlostní vlak francouzských státních drah
- 9) TM – trakční měnírna
- 10) TT – trakční transformovna

1 Úvod

Elektrické napájecí soustavy slouží jako přívod energie do hnacích vozidel pro přepravu osob a zboží převážně na kolejnicích. V Evropě se využívají různé systémy, což způsobuje problémy na stykových místech při přejezdu mezi dvěma různými soustavami. Tyto problémy se nejlépe řeší využitím dvou až vícesystémových lokomotiv, které jsou schopny pohybu pod více druhy trakčního vedení.

Napájecí soustavy se dělí na dvě základní skupiny, starší systémy stejnosměrné a novější střídavé. Každá napájecí soustava, ať už stejnosměrná nebo střídavá, má různé napěťové hodnoty. Se zvyšující hodnotou výkonu P se úměrně zvyšuje napětí U nebo proud I podle obecného vzorce:

$$P = U \cdot I \quad (1)$$

Vyšší napětí nese velká pozitiva v menších ztrátách vedením. Musí se však klást větší důraz na izolaci vedení a bezpečí osob.

S rostoucím proudem, při konstantním odporu R , se ztráty ve vodičích ΔP zvětšují kvadraticky podle obecného vzorce:

$$\Delta P = R \cdot I^2 \quad (2)$$

Proto se volí vhodný kompromis mezi velikostí napětí a proudu s ohledem na ztráty ve vedení.

V České republice se hlavní dálkové tratě napájí stejnosměrnou soustavou 3 kV nebo střídavou 25 kV, 50 Hz. V procentuálním zastoupením převažuje starší stejnosměrný systém, ale všechny tratě mají být v budoucnu přepnuty na střídavé napětí, kvůli menším ztrátám a s návazností na plánovanou vysokorychlostní trať v ČR.

2 Cíl práce

Cílem práce je charakterizovat jednotlivé elektrické napájecí soustavy užívané v dopravě v rámci Evropy, včetně detailnějšího popisu napájecích soustav užívaných v České republice. Charakteristiky vybraných napěťových soustav budou ověřeny výpočty.

3 Elektrické dráhy

Na počátcích elektrických drah se zkoumalo, zda je výhodné přejít na závislou trakci. Výstavba pevných trakčních zařízení není vůbec levná. Při velkém sledu vlaků se však začíná mnohonásobně vyplácet. Hodnoty uvedené v tabulce 1 hovoří jasně pro elektrické dráhy, oproti ostatním mají několikanásobně větší účinnosti. Nesmí se však zapomínat, že elektrická energie se získává složitými přeměnami v elektrárnách. Z toho plyne, že sice elektrická vozba je velmi účinná, ale musí se k tomu ještě započítat účinnost elektráren plus vliv na životní prostředí. [1] [2]

Tab. 1: Energetická účinnost v železniční dopravě

Vozba	Optimální účinnost	Ztráty naprázdno	Střední roční účinnost
Parní	9–11 %	20%	3–4 %
Turbinová (plynová)	17–19 %	17%	8–10 %
Dieselová	38–42 %	8%	20–25 %
Elektrická	90%	2%	80–85 %

[2]

3.1 Historický vývoj elektrických tratí

3.1.1 Vývoj v Evropě

První elektrický pohon byl použit v pozemním vozidle asi v roce 1835 kovářem Thomasem Davenportem z Brandonu v severoamerickém státě Vermont. Na malých kruhových drahách ve Springfieldu a Bostonu předváděl elektricky poháněné vozidlo, což byla první elektrická lokomotiva. Bohužel se nedochovala přesná dokumentace jeho konstrukce. Ve stejném roce postavili inženýři Stratting a Becker v holandském Groningenu, také vůz poháněný elektrickou energií, a to z Voltova sloupce. Vývoj vozidel i elektrických

drah šel stále kupředu, až Henry Pinkus získal patent základního významu pro elektrickou vozbu. Pinkus navrhoval využití kolejnic jako i trakční vedení pro napájení. Major A. Bessol dostal patent ve Francii a v Rakousku na využití třetí kolejnice, pro napájení stabilního zdroje. Až čtyřicet let po vzniku elektrických vozidel přichází v roce 1875 mechanik G. F. Green s návrhem přívodu proudu po vodičích, umístěných nad tratí. Toto tedy byla první myšlenka trolejového vedení, jaké známe dnes.

První elektricky napájená dráha, která sloužila pro veřejnost, postavila firma Siemens & Halske v Lichterfelde u Berlína. Provoz byl zahájen 16. května 1881. Dráha měřila 2,5 km a byla napájena napětím 160 V, kde proud byl veden v kolejnicích. Firma Siemens & Halske ještě ten rok předvedla na světové výstavě v Paříži první tramvaj, která měla vrchní přívod proudu.

Na počátku roku 1890 bylo v Evropě 71 km elektrických drah a 140 lokomotiv. Za dalších šest let už překročila první tisícovku kilometrů a ke konci století elektrifikované dráhy čítaly přes 3000 km. Následně už kilometry rostly téměř o 10 % každým rokem. [3]

3.1.2 Vývoj v USA

V Americe se začaly stavět elektrické dráhy až později. V roce 1879 si nechal St. D. Field patentovat výstavbu drah, stejně tak učinil i o rok později známější T. A. Edison. Oba vynálezci se v roce 1882 spojili a vytvořili společnost Electric Railway Company. Hned další rok v Chicagu a Louisville začala firma stavět lokomotivu, která připomínala svým vzhledem tvar parní lokomotivy a zvládla přepravu jednoho vozu se 16 cestujícími. Lokomotiva používala k přívodu proudu kolejnice, obdobně jako v Evropě 1879 až 1881 firma Siemens.

Zpoždění oproti Evropě měla Amerika i ve vedení proudu vrchem. Až dva roky po Siemensovi to vyzkoušel Leo Daft. První elektrickou dráhu v USA s použitím Daftova způsobu, která sloužila pro veřejnost, postavili v Clevelandu v roce 1884 E. W. Bentley & Walter H. Knight. [3]

3.1.3 Vývoj v České republice

Na našem území byla první elektrickou dráhou tzv. Křižíkova tramvaj na Letné v Praze. František Křižík byl velký propagátor elektrické energie a jeho tramvaj byla postavena k příležitosti Jubilejní výstavy v Praze 1891. F. Křižík měl na výstavbu tratě velmi málo času, proto odkoupil tramvajový vůz od Schuckerta z Norimberku. Druhý vůz nechal postavit v Ringhofferově vagonce na Smíchově. Tramvajím dal však vlastní motory. Dráha znamenala

obrovský průlom, neboť vyvrátila nedůvěru v elektrický pohon městské hromadné dopravy. Bohužel tato dráha měla nulový obchodní úspěch. Poté mnoho měst začalo vymýšlet výstavbu elektrických tramvají nebo malodráh. [3]

V dnešní době, kromě autobusů, také tramvaje s trolejbusy zajišťují pozemní dopravu v mnoha českých městech, jako je například Plzeň, Ostrava, Jihlava. V Praze navíc je v provozu metro, které ročně přepraví přes miliardu cestujících. [4]

V roce 1905 byla elektrifikována první železniční trať mezi Bečyní a Tábořem, stejnosměrným napětím 1500 V. V meziválečném období začala v roce 1926 elektrifikace pražského uzlu napájeného stejnosměrným systémem 1500 V. Cílem bylo dostat elektrickou trakci až do Plzně. Elektřina v běžném provozu však nenadchla, neboť se uhelné pánve zdály nevyčerpatelné. Další velká elektrifikace začala až ve 40. letech minulého století, ale díky větším požadavkům na výkony lokomotiv se napětí zvýšilo na stejnosměrných 3 kV. V roce 1949 započala elektrifikace hlavní tratě s dnešním stejnosměrným napětím 3 kV z Děčína přes Prahu, Ostravu, Košice až do Čierné nad Tisou. Práce trvaly dlouhých 15 let.

V 60. letech se v Evropě začala objevovat střídavá napájecí soustava s parametry 25 kV, 50 Hz. V České republice bylo rozhodnuto v roce 1959, že tento nový systém bude zaveden i u nás, ale kvůli dokončování stavby z Děčína na Slovensko, byla republika rozdělena na dvě části touto tratí. [5]

3.2 Charakteristiky elektrických hnacích vozidel

Elektrická charakteristika obsahuje souhrn vlastností elektrického trakčního zařízení:

- napětí v trakční síti
- proud
- výkon

Co se týká lokomotiv, tak zde lze najít:

- převodový poměr mezi motorem a nápravou
- rychlost lokomotivy
- tažnou sílu lokomotivy
- trakční křivky
- maximální tažnou sílu lokomotivy z nulové rychlosti
- adhezní poměr při trvalém výkonu
- elektrické brzdění
- řízení rychlosti.

Z tohoto výčtu vlastností jsou hlavními prvky výkon trakčního motoru s plným buzením a napětí trakční sítě s jeho jmenovitou hodnotou, která má dovolenou odchylku směrem dolu i nahoru. U stejnosměrných proudových soustav je dovolená odchylka + 20 a - 33 %. U jednofázových střídavých systémů se sníženým kmitočtem jsou odchylky ± 10 % a soustav s kmitočtem 50 Hz je odchylka + 10 a - 20 %. [6]

3.3 Rozdělení železničních elektrických hnacích vozidel

Elektrická hnací vozidla můžeme rozdělit do mnoha skupin:

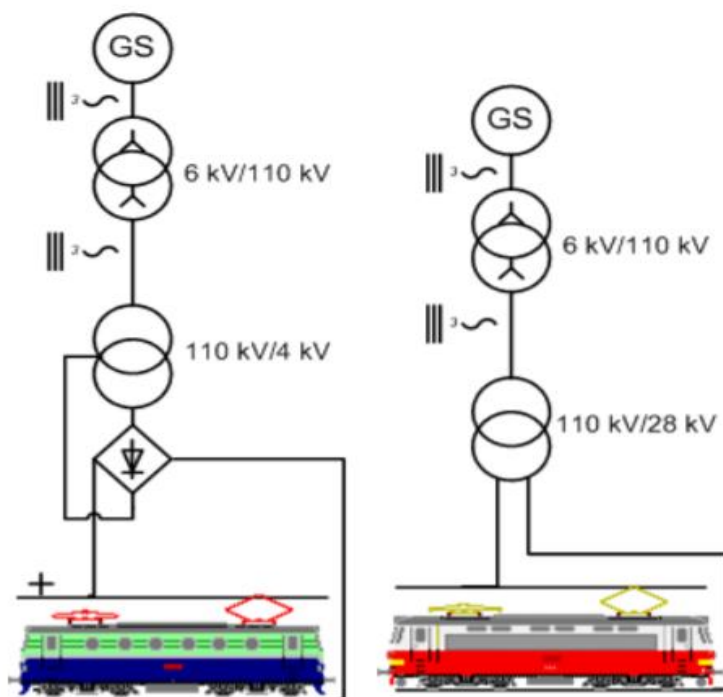
- a) Třídění podle jízdní dráhy:
 - hnací vozidla kolejová
 - hnací vozidla bezkolejová
 - hnací vozidla nekonvenčních drah – např. Maglev
- b) Třídění podle přívodu energie:
 - závislá (elektrická trakce)
 - nezávislá (dieselové, parní a plynové lokomotivy)
- c) Třídění podle účelu:
 - lokomotivy jednoúčelové (osobní, nákladní)
 - lokomotivy víceúčelové (osobní + nákladní)
 - lokomotivy staniční
- d) Třídění podle stavby mechanické části:
 - konstrukce rámové – např. parní lokomotiva
 - vozidla podvozkové
 - vozidla vícedílná (několik vozových skříní na společném podvozku)
 - vozidla vícečlenná (vzájemně spojené, rozebíratelné členy)
- e) Třídění podle proudové soustavy:
 - vozidla stejnosměrná
 - jednofázová střídavá sníženého kmitočtu ($16 \frac{2}{3}$, 25 Hz)
 - jednofázová průmyslového kmitočtu (50, 60 Hz)
 - trojfázová sníženého ($16 \frac{2}{3}$ Hz) nebo průmyslového kmitočtu (dnes již nepoužíván)

f) Třídění podle způsobu napájení trakčních motorů:

- přímé napájení – použitý proud přímo z trakčního vedení
- nepřímé napájení – mění se proudová soustava, velikost napětí nebo kmitočet přiváděného proudu z trakční sítě, např. u asynchronních motorů frekvenčně regulovaných [6]

4 Napájecí systémy na železnicích

Napájecí systémy můžeme rozdělit na dva základní, a to stejnosměrný (DC) a střídavý (AC). Na obrázku 1 je ukázán princip napájení obou systémů, přesněji používaných u nás, 3 kV DC a 25 kV, 50 Hz AC. [7]



Obrázek 1: Princip napájení DC vlevo a AC tratě vpravo [7]

4.1 DC 750 V

Stejnoseměrná soustava 750 V a 600 V jsou nejvíce používanými soustavami v městské hromadné dopravě. Například v České republice se soustava DC 750 V používá pro napájení pražského metra. Pro vlakovou dopravu je tato soustava využívána ve velké míře např. na jihovýchodě Anglie, kde funguje hustá železniční síť s osobní dopravou elektrickými jednotkami jezdícími v poměrně krátkých intervalech. [8]

4.1.1 Výhody, nevýhody

Velkou výhodou je bezpečnost s ohledem na provozované napětí oproti jiným soustavám. Ale oproti tomu je velmi velká nevýhoda ve vysokých proudových hodnotách a omezení výkonů dnešních moderních vozidel. Další nevýhodou je nutnost husté napájecí sítě kvůli velkým ztrátám ve vedení. [8]

4.2 DC 1,5 kV

Napájecí stejnosměrná soustava 1500 V se budovala v období, kdy byla nižší úroveň elektrotechniky, tj. mezi první a druhou světovou válkou. Ve státech, kde je ještě v provozu (jižní část Francie, Nizozemsko) přináší problémy. Soustava není schopná přenášet požadované výkony v troleji, ani při průřezu přes 1000 mm². Oproti ostatním systémům 3 kV, 15 kV a 25 kV musejí vícesystémové lokomotivy pracovat pod tímto vedením s omezeným výkonem. Vývoj se ukončil v 30. letech minulého století. [8]

Soustava se stejnosměrným napětím 1500 V je v České republice dnes pouze na jedné trati. Trať mezi Tábořem a Bechyní. Na této trati se největším podílem přičinil František Křížík, který i přes překážky tehdejší doby a úřadů dokázal postavit na začátku 20. století vedlejší trať spojující Tábor a Bechyni.

Trať na svoji délku a umístění pouze jediné elektrárny potřebovala poměrně vysoké napětí, ale to rakouské úřady nechtěli povolit. A proto F. Křížík jako známý zastánce stejnosměrného proudu vytvořil trakční proudovou trojvodičovou soustavu 2 x 700 V. Mezi trolejemi, které byly od sebe 1200 mm, bylo napětí 1400 V a mezi vodičem a kolejnicemi pouze 700 V.

Na svém počátku byla trať napájena parní elektrárnou v Táboře, která dodávala elektrický proud i do veřejné sítě. V elektrárně byly nainstalovány tři stojaté parní stroje s kondenzací, kde řemenovým převodem byla poháněna dvě derivační dynamy s výkonem 80 kW při jmenovitém napětí 700 V.

Slavnostní zahájení se konalo 21. června 1903. O dopravu se staraly dva elektrické vozy, kde jejich vozovou část vyrobily Ringhofferovy závody na Smíchově a elektrickou část sám František Křížík.

Kvůli zvyšování nároků přestala později vyhovovat napájecí soustava, kterou vymyslel F. Křížík. Proto v roce 1959 byla uvedena do provozu nová měnična, která se nacházela uprostřed trati v Malšicích. Měnična měla v sobě dva vzduchem chlazené rtuťové usměrňovače, kde každý z nich dodával 750 A při jmenovitém napětí 1500 V. V troleji se nacházel záporný pól.

Poslední inovací této trati a napájecí soustavy byla v roce 1978, když v měničně nahradili rtuťové usměrňovače křemíkovými a současně byla změněna polarita a na trolejové vedení byl připojen kladný pól. [3]

4.2.1 Výhody, nevýhody

Výhodou s ohledem na velikost jmenovitého napětí DC trakčních motorů je přípustné motory hnacích lokomotiv zapojovat paralelně, to přispívá ke zlepšení adhezních vlastností ve druhé fázi rozjezdu. Další plus je díky nízké hodnotě DC zhašení elektrického oblouku při zkratu a nižší nároky na izolaci vedení.

Nevýhodou jsou vysoké hodnoty proudů v trakčním vedení, které potřebuje zesilování vedení spojené s hustší sítí napájecích stanic a omezený výkon lokomotiv, jedoucí pod tímto systémem. [8]

4.3 DC 3 kV

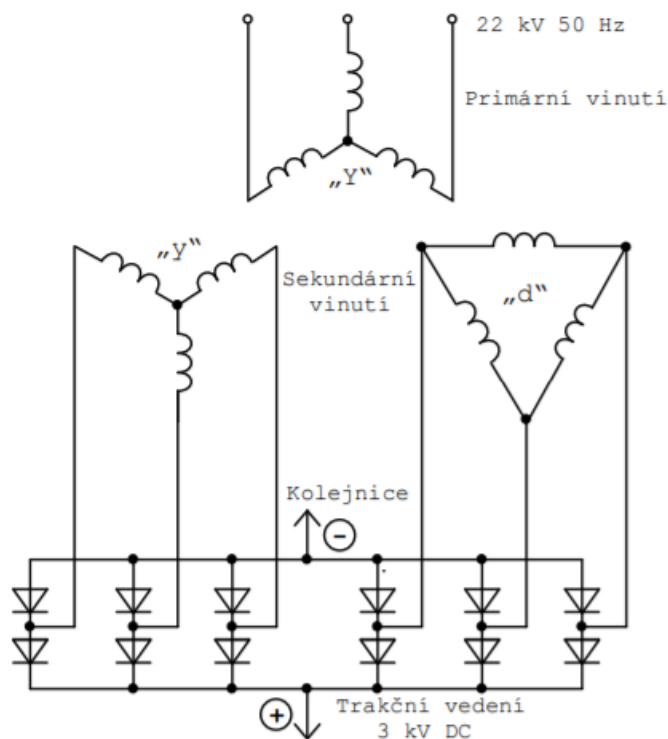
Nejvíce používaná stejnosměrná soustava má napětí 3000 V. Začátek tohoto systému byl kvůli větším nárokům na výkony lokomotiv a starší typy s menšími napětími toho nebyly už schopny. Využívá se hlavně v Belgii, Itálii, Polsku, Španělsku a severní části České republiky a Slovenska. Výhoda v jednoduchosti trakčních vozidel pominula v druhé půlce minulého století s příchodem polovodičové regulace, a hlavně střídavého napětí v trakci. Systém má vysoké ztráty na trolejovém vedením, poté nemá schopnost přivést dostatek energie pro dnešní výkonná hnací vozidla a je nutné vytvářet umělé mezery, neboť systém není schopen napájet vozidla v rychlém sledu za sebou. [8]

4.3.1 Trakční měnírny

Stejnosměrná trakční soustava je napájena z trakčních měníren. Do trakční měnírny je přivedeno napětí z distribuční sítě 110 kV 50 Hz, v tomto případě následuje transformace 110/22 kV, nebo ze sítě 22 kV 50 Hz. Oba případy se následně transformují 22/3 kV a poté usměrňují. Postupem času se ukázalo, že dvojí transformace s mezistupněm na napětíové hladině 22 kV je výhodnější a technicky spolehlivější.

ČD mají pro trakční usměrňovač jednotné schéma tvořené dvěma paralelně pracujícími trojfázovými můstky, což dovoluje dvanáctipulzní usměrnění trakčního proudu. Na prvních elektrických tratích měly měnírny rtuťový usměrňovač, následně germaniové a v dnešní době křemíkové diody. Dřívější schéma trakčního usměrňovače obsahovalo také tzv. nulovou tlumivku vloženou mezi kladné vývody obou můstků. Byla tam kvůli oddělení obou sekcí v oblasti komutace proudů, jež probíhala v okruhu každého můstku samostatně, jako by šlo

o dva šestipulzní usměrňovače. Základní schéma trakčního usměrňovače se nachází na obrázku 2. [9]



Obrázek 2: Schéma trakčního usměrňovače [9]

Rozdělovače stejnosměrné soustavy 3 kV mají vzduchové tlumivky 4mH, které se zapojují do série pro každou usměrňovací jednotku pro kladný pól nebo do společného zemního pólu celé měřirny. Slouží pro omezení nárůstu zkratového proudu.

Každý úsek napájený z trakční měřirny nemusí být galvanicky oddělený, oproti střídavé trakci, napájení je možné oboustranné. Díky podélnému propojení úseků se snižuje výstupní napětí z měřiren, a to má pozitivní dopad na úspěšnost rekuperace, která je jednodušší než u střídavého napájecího systému 25 kV, 50 Hz. O tématu rekuperace je více v kapitole 4.5.1. Měřirny SŽDC jsou od sebe vzdáleny cca 20 km. [9] [10]

4.3.2 Výhody, nevýhody

Výhody elektrické soustavy DC 3 kV jsou v možnost rekuperace díky diodovým usměrňovačům, na TM nedochází k přetokům výkonů do napájecí DS a k jejímu ovlivňování. Při této rekuperaci je potřeba zajistit, aby v úseku, kde jedno vozidlo rekuperuje, bylo další

vozidlo, které dodávanou energii spotřebuje nebo jiný akumulací prvek schopný tuto energii pojmout.

Nevýhoda je, ve srovnání se soustavami napájenými střídavým napětím, větší množství trakčních napájecích stanic, kde vzdálenost mezi jednotlivými trakčními měnirny je okolo 20 km. Trakční měnirny jsou, co se týče technologie, složitější oproti transformovným, jež napájí soustavy AC. Soustava je zatížená vysokými trakčními proudy a s tím souvisí vysoké ztráty na vedení. Dále oproti AC soustavám se musejí dělat umělé mezery mezi vlakovými soupravami, neboť není schopna napájet vlaky v rychlém sledu po sobě. Další problematikou DC soustavy jsou bludné proudy a zhášení oblouku při přechodových jevech. [8]

4.4 AC 15 kV, 16 2/3 Hz

Střídavá soustava 15 kV, 16 2/3 Hz má dvě různé označení. Právě 15 kV, 16 2/3 Hz nebo 16,7 Hz. Dále v práci se bude používat označení 16 2/3 Hz.

Napájecí systém 15 kV, 16 2/3 Hz vznikl z požadavku zvýšení napájecího napětí a využití střídavého proudu v elektrické trakci. Systém byl zaveden na počátku 20. století v Německu, Rakousku, Švýcarsku a Norsku. Ke snížení frekvence došlo kvůli technickým důvodům. K nim patřilo zlepšení komutace jednofázových motorů bez nutnosti využití usměrňovače, který ale dnes už není potřeba díky dnešním třífázovým motorům. Dále to byla možnost transformace, kde stačilo použití běžných transformátorů pouze s robustnějším magnetickým obvodem. Hodnota 16 2/3 Hz je odvozena z 1/3 síťového kmitočtu, jenž se dal snadno zrealizovat pomocí rotačních měničů na bázi šestipólového synchronního motoru a dvoupólového alternátoru. Takto snížený kmitočet se ukázal jako vhodný pro napájení komutátorových motorů trakčních vozidel. Příznivé se ukázalo také potřeba menšího počtu napájecích stanic nebo spojitě dvoustranné napájení bez střídání fází, to dovoluje budovat levné trakční vedení bez neutrálních polí a nepřerušované napájení elektrických lokomotiv. Trakční soustava 16 2/3 Hz má vlastní jednofázové přenosné vedení vysokého napětí, nezávislé na třífázové rozhodné síti. Kvůli tomu není problém s rekuperací energie, neboť je propojená celá soustava, tak odpadají problémy s neutrálními póly při střídání fází a je docíleno téměř stoprocentní odebírání rekuperované energie.

Se systémem 15 kV, 16 2/3 Hz v zemích, kde se využívá, se nadále pokračuje s rozšiřováním a další elektrifikací, a to hlavně například na vysokorychlostních tratích, které zvládá napájet. Zhruba 12 km dlouhý úsek najdeme i u nás, trať Znojmo – Šatov je ale napájena z Rakouska. [8]

4.4.1 Výhody, nevýhody

Výhodou napájecí soustavy 15 kV, 16 2/3 Hz jsou malé ztráty ve vedení, díky poměrně nízké impedanci vedení a malé hustoty napájecích stanic, kde vzdálenosti mezi stanicemi se pohybují okolo 40 až 60 km. Lze docílit bezproblémové rekuperace a díky samostatnému vedení a zdroji je nezávislá na celostátní energetické síti. Díky tomu, že nedochází ke změnám fází, je možnost dvoustranného napájení.

Naopak nevýhodami napájecího systému je nutnost vybudovat speciální vysokonapěťovou soustavu nebo stanice s měniči frekvence. Další nevýhodou je omezený trakční výkon celé napájecí soustavy. [8]

4.5 AC 25 kV, 50 Hz

Jedná se o AC jednofázovou napájecí soustavu pro železniční dopravu, používanou nejen u nás, ale také například ve Francii, Belgii, Bulharsku, Maďarsku nebo na Slovensku. Jedná se o soustavu s největším podílem v celé Evropě. V České republice je pokryto 42 % elektrifikovaných tratí tímto systémem, převážně se nacházejí v jižní části země. Velká výhoda systému je, že ve vedení nejsou tak velké ztráty oproti stejnosměrným soustavám. [8]

Tato střídavá napájecí soustava nevyžaduje výstavbu měníren, ani zvláštního napájecího vedení. Z napájecí distribuční sítě s napětím 22 kV získáme jednoduchou transformací napěťovou hladinu 25 kV. [8] [11]

Obecný princip transformátoru je zobrazen na obrázku 3.

Základní vzorec pro transformátor je:

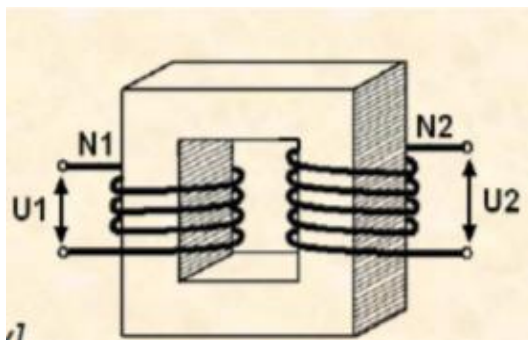
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3)$$

U_1 vstupní napětí [V]

U_2 výstupní napětí [V]

N_1 počet závitů vstupní cívky [-]

N_2 počet závitů výstupní cívky [-]



Obrázek 3: Transformační poměr [11]

Transformační poměr je definován:
$$p = \frac{N_2}{N_1} \quad (4)$$

Bohužel soustava sebou nese nerovnoměrné proudové zatížení třífázové distribuční sítě, která způsobuje asymetrii třífázového napětí ostatním odběratelům distribuční sítě, nesymetrie způsobuje též zvýšený ohřev motorů. Distributor proto povoluje odběr jen do určité hodnoty jednofázového výkonu na závislosti impedance sítě neboli jejímu zkratovému výkonu v místě odběru. Aktuální hodnota odběru jednofázového zkratového výkonu byla stanovena na 2 %, ale nyní pouze na 0,7 %. Změna ze strany distributora je dána povinností dodávat odběrateli nezkreslené symetrické třífázové napětí. Při stoupající spotřebě energie je potřeba se věnovat otázce asymetrie čím dál víc. [12]

Velkou výhodou jsou malé ztráty ve vedení oproti soustavám s menším napětím a s tím spojené i menší průměry trolejového napětí. Napájení přes trakční transformovny má výhodu v menší potřebě stanic, kde rozmezí mezi stanicemi se pohybuje kolem 40 až 60 km a jsou o hodně jednodušší než trakční měničky, které se starají o DC soustavy. [8]

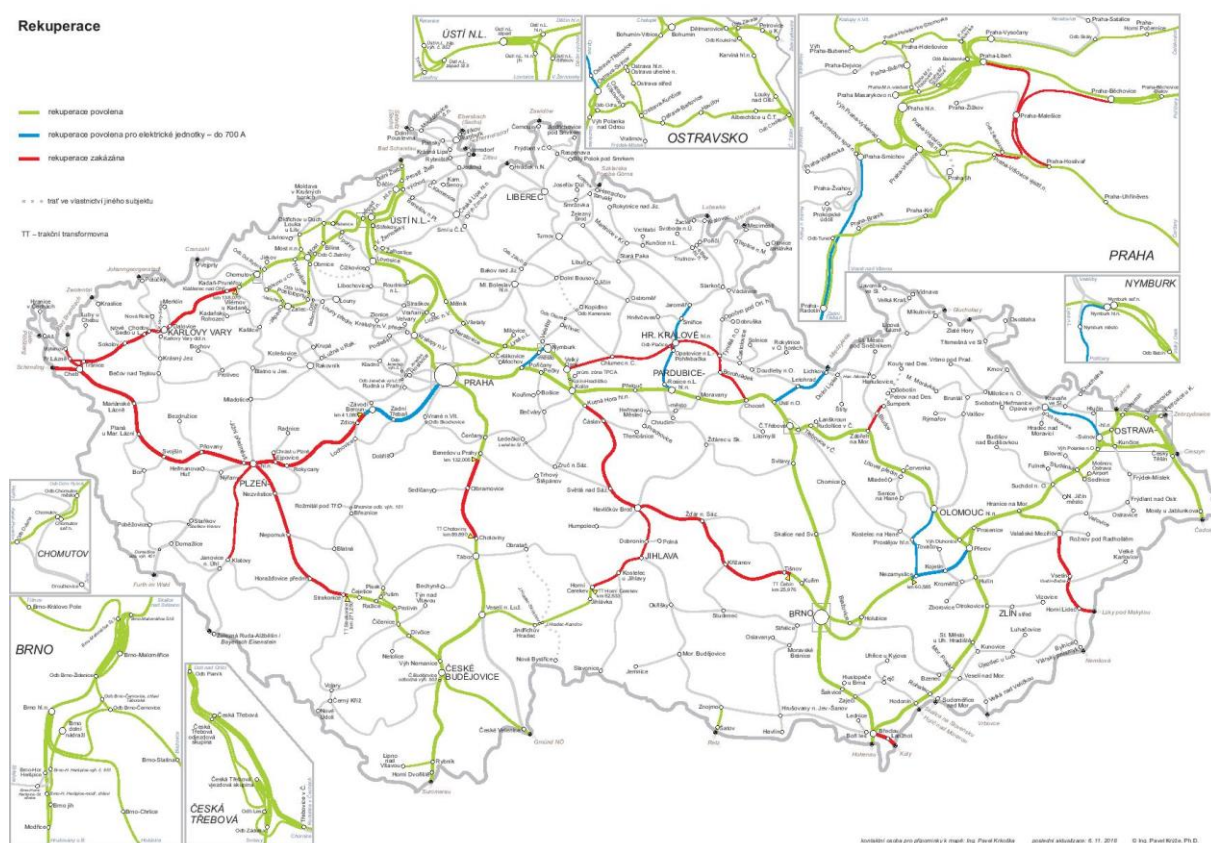
4.5.1 Rekuperace

Zajištění rovnoměrného zatížení veřejné sítě se dociluje napájením jednotlivých úseků z různých fází, které musejí být od sebe na trolejovém vedením oddělené neutrálními poli. To způsobuje další problém při rekuperačním brzdění neboli vracení elektrické energie zpět do sítě distributora, které se tak stává nevýhodné. Distributoři elektrické energie se rekuperaci brání z ekonomických, ale i technických důvodů. Rekuperaci si můžeme představit jako alternativní zdroj, který vyrábí elektrickou energii nárazově a nejde ovlivnit stejně jako například větrnou elektrárnu. Vlakové brzdění se tak nemusí nacházet druhý den ve stejném místě nebo nebude mít stejnou rychlost. Takový přívod je nárazový s nízkým účínkem a deformuje průběh napětí a proudu, protože v daném úseku nemusí být jiné vozidlo, které by danou

energii odebralo. Problém je řešen použitím zpětných wattových ochran, které způsobí odepnutí stanice od distribuční sítě v případě zpětného toku směrem do distribuční sítě.

Od roku 2008 na pokyny generálního ředitele SŽDC je zaveden zkušební provoz rekuperace elektrických hnacích vozidel (EHV) na vybraných úsecích elektrizovaných jednofázovou soustavou AC 25 kV, 50 Hz. Na těchto úsecích se blokují zpětné wattové relé a provoz se řídí zvláštními ustanoveními. [8] [13]

Na přiloženém obrázku 4 jsou zelenou barvou znázorněny tratě, kde je rekuperace povolena. Na velké části tratí je stále úplně zakázána, tyto tratě jsou označeny červenou barvou. Jsou i místa na stejnosměrném napětím, kde je rekuperace dovolena, ale pouze pro vozidla do 700 A, tratě označené modrou barvou. [7]



Obrázek 4: Mapy rekuperace v ČR [7]

4.5.2 Trakční transformovny

O napájení střídavé trakce 25 kV, 50 Hz se starají trakční transformovny, jež jsou napájeny z distribuční sítě 110 kV a po transformaci 110/27 kV, kde 27 kV je jmenovitá hodnota vnitřního napětí TT. Transformovny jsou většinou napojeny pomocí rozvodu

typu „H“, neboť umožňuje připojení k 110 kV sítí u jednoduchého vedení zasmyčkováním nebo u dvojitého vedení odbočením.

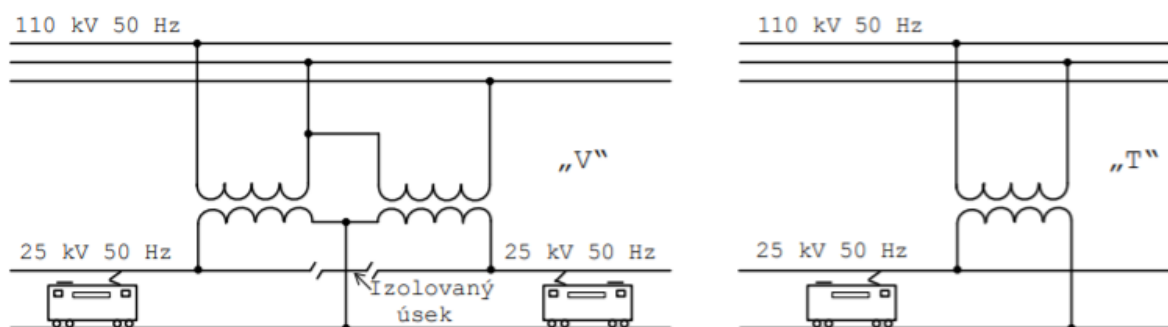
Trakční transformátory mají jiné řešení od normálně využívaných energetických transformátorů. Tyto transformátory jsou na konci připojené na dvě fáze – sdružené napětí – vedení 110 kV. Řešení kvůli zvýšené zkratové odolnosti, musejí zvládnout také velké krátkodobé přetížení (maximálně 200 % po dobu 2 minut), dané charakterem proměnlivého trakčního odběru. ČD využívají tři typy trakčních transformátorů – s výkonem 6,5/8 MV·A, 10/12,5 MV·A a 10/13 MV·A. Hodnoty se udávají pro jmenovitý výkon bez ofukování/s ofukováním a napětí nakrátko u_k bývá kolem 12,5 %.

TT jsou většinou vybaveny dvěma transformátory, přičemž v provozu může být jeden a druhý je jako záloha, nebo oba souběžně. Rozhoduje se na koncepci napájení, které jsou uvedeny dále. U ČD je trakční vedení napájeno převážně jednostranně (obrázek 5).

1. Schéma označené jako „V“ je případ, kdy jsou zapnuty oba transformátory najednou. Jeden napájí trať ve směru „doprava“ a druhý „doleva“. Nezáleží na tom, jestli jde o jednokolejový či dvoukolejný úsek. Traťový úsek je vymezen transformátorovou stanicí a s trakční spínací stanicí. Tento typ se využívá na značně zatížených úsecích, nebo kde je trakční transformátorová stanice připojena k síti 110 kV s menším zkratovým výkonem kvůli snížení nesymetrie zatížení této sítě. Oba trakční transformátory jsou zapojeny na rozdílné fáze.

2. Schéma „T“, kdy se využívá pouze jeden transformátor pro napájení v obou směrech. Také zde nezáleží, zda jde o jednokolejný nebo dvoukolejný traťový úsek. Při tomto typu napájení leží trakční transformátorová stanice přibližně uprostřed napájeného úseku.

Na našem území je vzdálenost mezi sousedními trakčními transformátorovými stanicemi v průměru 42 km. [9]



Obrázek 5: Koncepce napájení trakčního vedení u ČD: "V" a "T" schéma [9]

4.5.3 Výhody, nevýhody

Díky většímu napětí je možnost použití menších průřezů trolejového vedení a také jsou menší ztráty ve vedení. Oproti stejnosměrným soustavám napájecí stanice mají jednodušší provedení. Stanic nemusí být ani tolik za sebou, neboť u této soustavy se trakční transformovny nacházejí v rozmezí 40 až 60 km. [8]

Velká nevýhoda je zatížení trojfázové distribuční napájecí soustavy dodavatele a nedořešená problematika rekuperace, která byla do roku 2008 úplně zakázána. [8]

4.6 2 AC 25 kV, 50 Hz

Jedná se specifické řešení střídavého systému 25 kV, 50 Hz, kde je navíc vedlejší vodič 25 kV s opačnou polaritou.

Stále rostoucí požadavky na dodávaný výkon hnacím vozidlům vedlo k hledání dalšího řešení napájecích soustav. Omezení výkonu elektrických lokomotiv je obecně dáno přenosovými schopnostmi trakčního vedení. Výkon, jenž je soustava schopna přenést, je závislý hlavně na impedanci vedení. Aby byla možnost přenést více výkonu, je nutno zvýšit přenášené napětí nebo zmenšit podélnou impedanci v trakčním vedení. Napájecí soustava 2 AC 25 kV splňuje oba tyto parametry. Funkce soustavy spočívá v přivedení elektrické energie co nejbližší k místu potřeby dvouvodičovými vedením 50 kV a následné transformaci v místě potřeby neboli v úseku, kde se nachází lokomotiva. Transformace probíhá pomocí autotransformátorů na hodnotu 25 kV mezi trolejemi a kolejnicí. [8]

Napájecí systém se skládá z běžného trolejového vedení, které představuje jeden pól, a přívodního napájecího vedení vedeno souběžně s trolejovým vedením na trakčních podpěrách. Přívodní napájecí vedení představuje druhý pól, fázově posunuto oproti běžnému trolejovému vedení o 180°. Vodiče mají mezi sebou napětí 50 kV. Vzdálenost mezi napájecími stanicemi se pohybuje kolem 50 km. Autotransformátory se dávají do vzdálenosti 10 až 12 km. Tato soustava je označována jako AT soustava. Jinak koncepčně řešená BT soustava nepoužívá autotransformátory, ale tzv. booster transformátory. Výhoda AT soustavy je ve vzdálenosti transformátorů, která se pohybuje okolo 10 km na rozdíl od soustavy BT, kde booster transformátory musejí být po 3 km. [8]

Využití lze nalézt například na trati TGV z Paříže do Lyonu nebo z Říma do Florencie. Na velmi podobném principu, ale s kmitočtem 60 Hz jezdí elektrické lokomotivy Shinkasen v Japonsku. [8]

Na obrázku 6 je znázorněno vedení systému 2x25 kV, 50 Hz, kde na běžném vedení je kladný pól a na vedlejším vedení pól záporný. [14]



Obrázek 6: Pozemní vedení 2 AC 25 kV, 50 Hz [14]

4.6.1 Výhody, nevýhody

Napájecí systém 2 AC 25 kV, 50 Hz má nízký úbytek napětí v nadzemním trolejovém vedení, díky tomu je velká úspora energie. Soustava umožňuje zvětšit vzdálenosti mezi napájecími stanicemi. Kde se nenachází hnací lokomotiva neprochází kolejnicí ani zemí zpětný trakční proud. Trakční proud se uzavírá pouze v části tratí, kde se nachází elektrické hnací vozidlo a nejbližší autotransformátory. Tento způsob uzavírání zpětného trakčního proudu ve své podstatě vede k omezení rušivých vlivů z pohledu elektromagnetické kompatibility a také korozní účinky na ostatní podzemní zařízení. [8]

Jak už napovídá název soustavy, tak je potřeba dvakrát více nadzemních trolejových vodičů. Celkové náklady na pevné trakční systémy jsou vyšší než u jiných soustav, neboť je potřeba více technologických prvků, složitější napájecí stanice a nutnost výstavby trakčních autotransformátorů nebo booster transformátorů. V neposlední řadě je větší riziko vyšších lokálních zemních proudů při vyšších napěťových hladinách. [8]

5 Napájecí systémy pro MHD

Městskou hromadnou dopravu napájí stejnosměrná soustava s dvěma různými napěťovými hodnotami. Nižší hodnota je 600 V a vyšší 750 V. Výhodou je jednoduchá regulace sériového trakčního motoru, větší bezpečnost s ohledem na napětí oproti ostatním soustavám nebo nižší izolační hladina. Neboť v městě je hustá zástavba a trolejové vedení se nachází blízko domů, nebo je dokonce kotvení vedení připevněné na budově. Nevýhodou těchto trakčních systémů jsou vysoké proudové hodnoty, tím pádem omezování výkonu moderních vozidel. Oproti střídavému systému nutnost hustší sítě napájecích stanic a také složitější napájecí stanice. [8]

Zajímavostí je tzv. Tram-train, což je kombinace tramvaje a vlaku. Využívá se v Německu a v západní Evropě. Drážní vozidla jsou uzpůsobena na dvě napájecí soustavy (DC 750 V / AC 15 kV, 16 2/3 Hz). Výhoda využití vlaků celostátní dopravy na tramvajovém napětí. Tato souprava se nazývá S-Bahn. [8]

5.1 Metro

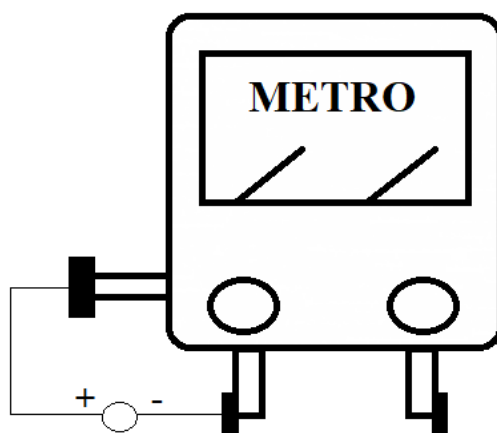
5.1.1 Vznik a vývoj

Slovní spojení „podzemní dráha“ se začala využívat v polovině 20. let minulého století. Díky navyšování počtu obyvatel ve městech a s tím spojené i zvětšování obyvatelné plochy se začalo mluvit o podzemních drahách. Prvním městem byl Londýn, kde v roce 1863 byl spuštěn provoz první trasy. Jednalo se ale o nezávislou trakci, přesněji o lokomotivu s parním motorem. Až v roce 1890 se v Londýně přešlo na elektrický pohon v podzemní dopravě. [15]

Zajímavostí je opět v Německu tzv. U-Bahn. Například v Berlíně tento typ dopravy zahrnuje cca 150 km a z toho jich je 80 % pod zemským povrchem. Je to spojení tramvaje a metra do jednoho, kde o napájení se stará třetí kolejnice, stejně jako u nás v metru i se stejným napětím 750 V. [16]

5.1.2 Napájecí kolejnice

Pro napájení metra se využívá tzv. napájecí kolejnice, která vede napětí 750 V stejnosměrného proudu. Jde o elektricky izolovanou kolejnici, která leží v malé výšce podél kolejnic a je připevněna na ocelových konzolách po straně koleje. V prostorách stanice je kolejnice chráněna laminátem. Nevýhodami tohoto způsobu napájení jsou poměrně velké proudy, nemožné využití vyššího napětí, nucené přerušování v místech výhybek, a hlavně nebezpečí úrazu elektrickým proudem. Napájecí princip přes třetí kolejnici je znázorněn na obrázku 7. [17]



Obrázek 7: Napájení metra přes třetí kolejnici [vlastní tvorba]

5.1.3 Napájecí měnič pro pražské metro

Kvůli spolehlivosti a maximálnímu zabezpečení dodávky elektrické energie má pražské metro úplně vlastní kruhovou kabelovou třífázovou síť 22 kV, 50 Hz. Síť spojuje vlastní distribuční stanice a distribuční stanice s měčnou. Měčny mají výstupní napětí pro napájení DC 750 V. [8]

5.2 Tramvaje

5.2.1 Vývoj na našem území

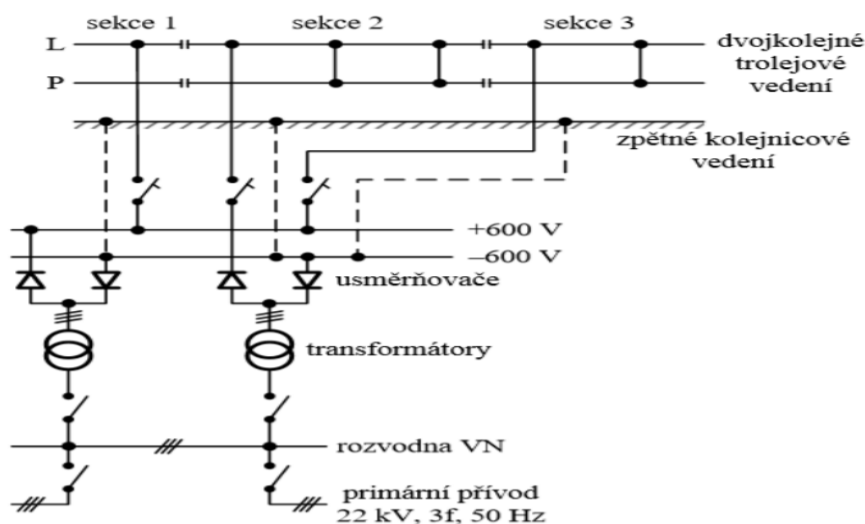
První tramvajové vozy, které sloužily na přepravu lidí, byly tažené koňmi. Vozy měly velmi lehkou dřevěnou kostru a vyráběly se ve dvou provedení: letní a zimní. Sklony silnic byly příznivé, takže jeden kůň dokázal utáhnout jeden vůz s kapacitou 20-30 cestujících. Koněspřežky se přestaly používat po první světové válce.

První elektrické tramvaje měly ocelový rám, na němž byla připevněna dřevěná skořepina. Z počátku bylo napájecí napětí poměrně nízké, 200 V. Později se zvýšilo na rozmezí 500 až 550 V. Další navýšení přišlo po druhé světové válce, na 600 V. Začátek elektrické hromadné dopravy bylo spojeno se stavbou městských elektráren a celkovou elektrifikací měst. [18] [19]

5.2.2 Napájení

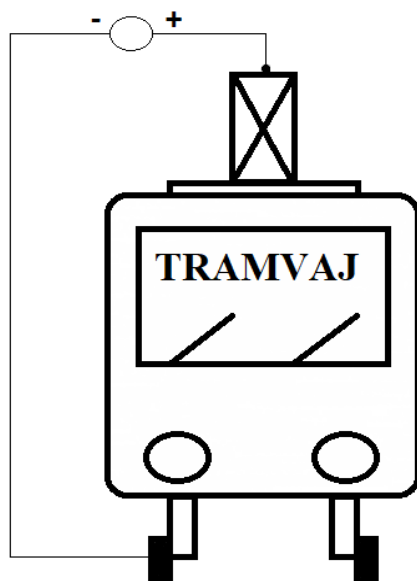
Tramvaje městské hromadné dopravy jsou napájeny stejnosměrným proudem o jmenovitém napětí 600 V. Soustava těchto parametrů má výhodu v jednoduchosti regulace sériového trakčního motoru. Do novějších tramvají se nyní dávají asynchronní motory.

Nevýhodami jsou vysoké proudové hodnoty, složitější i větší počet napájecích soustav. Kladný pól se nachází nahoře v troleji na sběrači a záporný dole v kolejnici. Trakční síť se dělí na jednotlivé úseky a buď jsou napájeny z trakčních měníren nebo z trakčních transformoven. Na obrázku 8 lze vidět, že tramvajová síť je napájena z rozvodny 22 kV, kterou nadřazuje rozvodna 110 kV. Stejnosměrné dráhy se napájí z trakčních měníren, kde se přeměňuje třífázová energetická soustava na soustavu stejnosměrnou. Velkým problémem je však pokles napětí, neboť při větší vzdálenosti roste odpor vedení. [8] [15]



Obrázek 8: Schéma napájení městských elektrických drah [15]

Na obrázku 9 je načrt principu napájení tramvaje, kdy v kolejnici máme záporný pól a v troleji, po které jede pantograf, je kladný pól. [8]



Obrázek 9: Napájení tramvaje [vlastní tvorba]

5.2.3 Trolejové vedení

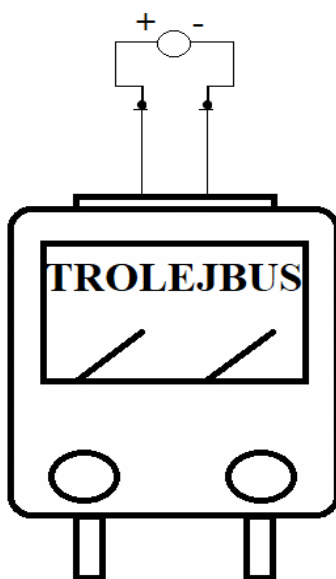
Trolejové vedení je součástí tzv. pevných trakčních zařízení, jež mají za úkol přenos elektrické energie od zdroje do vozidla. Tramvaje nebo trolejbusy mají na střeše sběrač, který odebírá proud z vedení. Vedení musí být stálé, nesmí se oteplovat nad kritickou mez a musí umožnit odběr daného proudu za klidu vozidla.

Při pohybu dopravního prostředku dochází k odběru elektrické energie pomocí trolejového drátu, který je veden nad kolejnicemi v podélném směru. Sběrač též odebírá proud do vozidla. Sběrač doléhá na trolejový drát pod stálým tlakem a jeho ližina (plocha smykadla) je vyrobena na způsob grafitu, která je namáhána při pohybu na opotřebení, ale díky klikatosti vedení nedochází k rovnoměrnému opotřebení a tím i vzniku drážky v ližině. Většímu poškození smykadla může dojít pomocí odsakování sběrače od drátu, například díky námraze nebo pevným bodům na trolejovém drátu. [20]

Trolejový drát je vyroben z elektrolytické mědi, kde čistota mědi je 99,8 %. Drát musí splňovat vysokou elektrickou vodivost, mechanickou pevnost, odolnost vůči mechanickému opotřebení, odolnost proti opalování a oxidaci. Vlivem smýkání drátu a sběrače vozidla dochází k opotřebení. Pokud se průměr drátu sníží na 70 % oproti počátečnímu, je potřeba ho nahradit novým. [21]

5.3 Trolejbusy

Trolejbusová doprava je posledním základním prostředkem v městské hromadné dopravě. Například v roce 1936 začalo město Praha provozovat trolejbusy, které ale roku 1972 zrušila. Trolejbusy přepravují cestující v řadě měst například v Brně, Ostravě, Jihlavě atd. Hodnota napětí v trolejích je stejná jako u tramvají, jediný rozdíl je, že záporný pól není v kolejnicích, ale na druhé souběžně vedené troleji. Ukázkou napájení lze vidět na obrázku 10. [22]



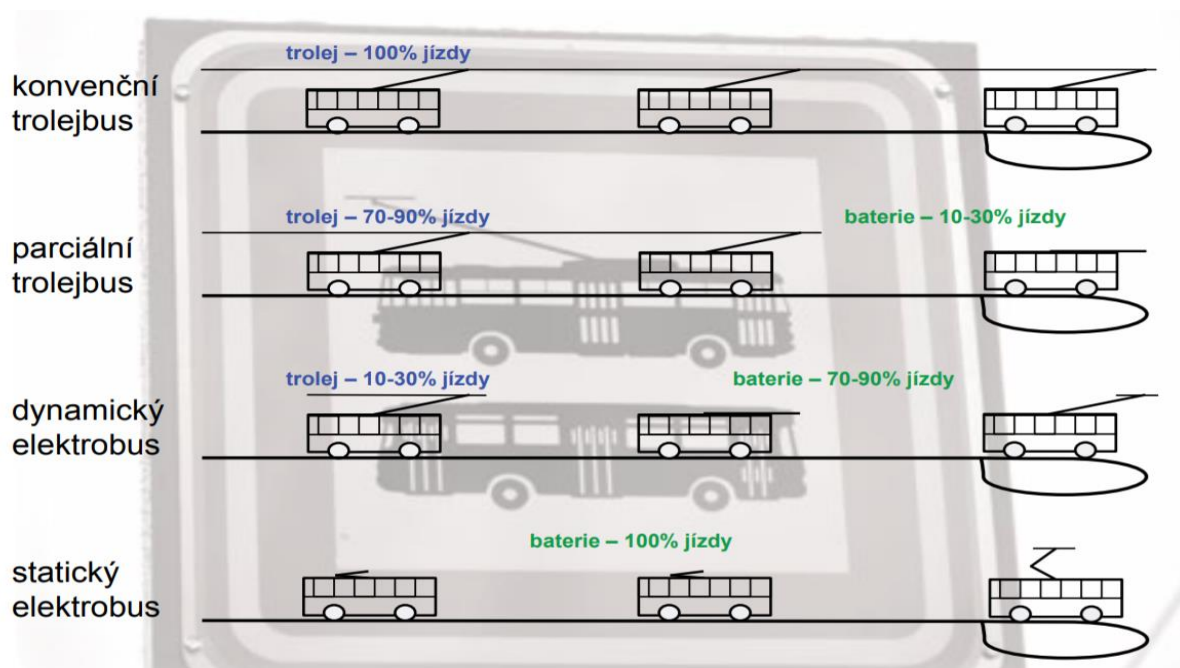
Obrázek 10: Napájení trolejbusů [vlastní tvorba]

5.3.1 Druhý trolejbusový systém

V rámci přechodu na elektrické pohony se v Praze zavedl tzv. druhý trolejbusový systém. V Praze byl slavnostně zahájen 15. října 2017 zkušební provoz jednokilometrového úseku v ulici Prosecká, přesně 45 let od ukončení trolejbusového provozu. Název druhý trolejbusový systém vznikl díky rozdílu od klasického konceptu provozu, kde se v celé své délce napájí z trolejí. Nový systém jede většinu své trasy na baterii a k vedení se připojuje pouze při dlouhém stoupání. Připojení slouží pro pohon elektromotoru a také pro dobíjení baterií pro pokračování v úseku. V tomto případě se jedná o dynamicky dobíjený elektrobuses.

Zkušební provoz trolejbusu v Praze byl ukončen 30. června 2018 a od 1. července 2018 je zde řádná linka číslo 58 z Palmovky do Letňan, jež je obsluhována jedním vozem Škoda 30Tr SOR. Do budoucna dle oficiálního stanoviska DPP se počítá s rozšířením úseku jízdy pod trolejovým vedením. [23] [24]

Celkově jsou čtyři druhy trolejbusu, lišící se procentuálním nabíjením a jízdou na baterii. Klasické trolejbusy, které jezdí ve všech větších městech jsou tzv. konvekční a jsou napájeny po celé své trase. Druhým typem jsou parciální trolejbusy, jež slouží na přepravu cestujících ve městě, ale také malý kousek do okolních obydlích. Prvním takovým městem, který „hybridní“ trolejbusy začal využívat bylo město Zlín v roce 2016. Posledním typem jsou statické elektrobusy. Statické, protože dobíjení baterií probíhá při stání na konečných zastávkách, poté celou svoji trasu jedou pouze na pohon z baterie. Název trolejbus nebo elektrobus je pouze legislativní úprava, neboť trolejbusy spadají do drážní dopravy. Grafický přehled je ukázán na obrázku 11. [23] [24]



Obrázek 11: Elektrické trolejbusy / elektrobusy [23]

V Praze můžeme potkat i hybridní autobus, který má DPP zapůjčený do konce května roku 2019. Autobus používá elektromotor při rozjezdu, tím pádem velmi šetří palivo, a i po rovině dokáže jet jen na elektrickou energii. Dobíjení probíhá pomocí rekuperačního brzdění. Díky tomuto typu autobusu se nemusí stavět nová infrastruktura. [25]

V dnešní dopravě se využívají už i elektrobusy, které se stíhají dobíjet na konečných zastávkách při čekání na další jízdu. Nebo dokonce na zastávce s větším prostojem pomocí kondenzátorů. [23]

6 Používané pohony v trakci

Historicky nejvíce používaným motorem je sériový stejnosměrný motor, který kvůli svým vlastnostem byl vhodným zdrojem plynule regulovaného momentu při použití jednoduché odporové regulace a také díky velkému záběrnému momentu. S vývojem pulzní regulace se více začal používat stejnosměrný motor cize buzený, kde hlavní výhodou je nižší energetická náročnost oproti klasickému sériovému motoru. Zdokonalování stejnosměrných motorů se na počátku 20. století zastavilo a díky rozvoji polovodičové techniky se začínají více využívat asynchronní motory, které jsou konstrukčně jednodušší. Neobsahují komutátor, který je náchylný na poškození, nedochází v motoru k jiskření a řídí se pomocí frekvenčních měničů. [26] [27]

Při výběru vhodného trakčního motoru se musí zohlednit hodně faktorů. Ze všeho nejdříve to jsou výkonové požadavky na elektrické trakční motory. Požadované výkony se liší, jestli se například jedná o lokomotivu používanou v nákladní dopravě nebo tramvaj v městské hromadné dopravě. Pro konkrétní příklad se hodí společnost Škoda Electric, jež vyrábí trakční pohony pro lokomotivy v rozmezích od 500 do 1600 kW, pro metro od 150 do 260 kW, pro trolejbusy se výkon pohybuje od 100 do 300 kW a poslední prostředek z MHD tramvaje mají motory s výkonem od 46 do 135 kW. [28]

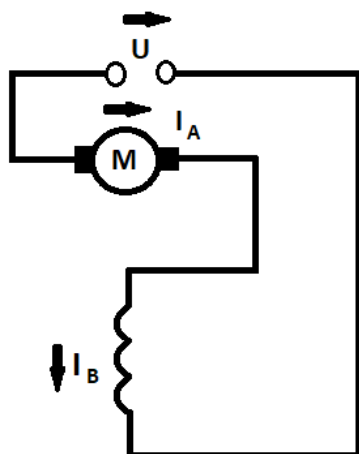
Druhou velmi důležitou věcí, na kterou se nesmí zapomenout je chlazení motorů. Trakční motory jsou velkým zdrojem odpadního tepla, tím pádem vyžadují dostatečné chlazení, aby nedošlo k poškození, v horším případě i k úplnému zničení motoru. V dnešní době můžeme najít tři druhy chlazení. Prvním typem je chlazení vlastní, jež obstarává ventilátor na hřídeli stroje. Druhý typ je tzv. cizí, který je výhodnější pro motory s většími výkony, protože se dá lépe regulovat. Poslední typ, který se využíván, je vodní chlazení. [28] [29]

6.1 Stejnosměrný sériový motor

Stejnosměrný sériový motor byl v dřívější době prakticky jediným motorem, který se v elektrické trakci využíval. Nejdůležitější výhodou a vlastností je jeho měkká otáčková charakteristika, kvůli které je jediným motorem, jenž lze řídit téměř bez problému se stupňovitou změnou napětí. Kdyby tato vlastnost chyběla, tak i malé změny napětí by vytvářely velké změny proudu a při stálém buzení tomu odpovídající změny momentu, které jsou pro hnací vozidla nepřijatelné. Při použití stejnosměrného sériového motoru pod

stejnou soustavou je ideálním zdrojem momentu bez momentového zvlnění a také je po omezenou dobu značně přetížený i v klidu. Díky těmto vlastnostem byl využíván i pro střídavé soustavy. [29]

Na obrázku 12 je náhradní schéma stejnosměrného sériového motoru a lze zde vidět, že je budící vinutí zapojeno v sérii s vinutím kotvy. Tím pádem zatěžovací proud je současně proudem budícím. [30]



M – stejnosměrný sériový motor

I_A – proud kotvy

I_B – budící proud

I_A = I_B

Obrázek 12: Náhradní schéma stejnosměrného sériového motoru [29]

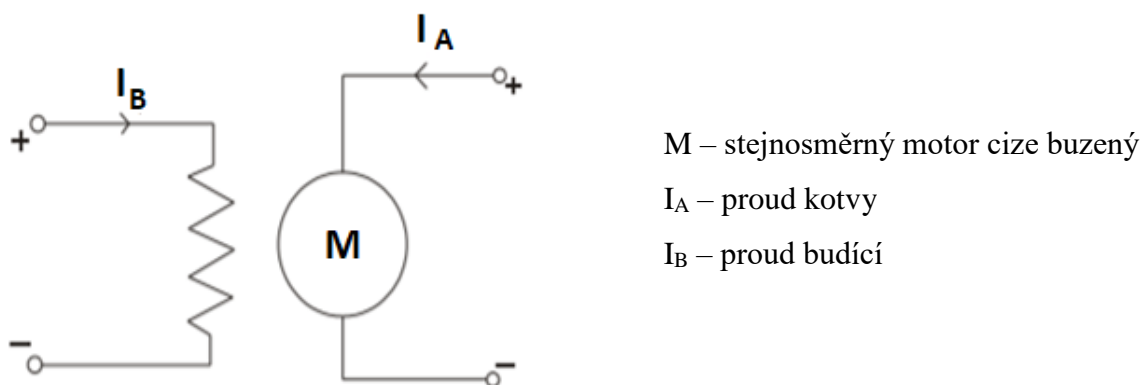
Nejznámějším zástupcem stejnosměrného sériového motoru najdeme v České republice v podobě tramvají Tatra T3, dříve psaná TIII. Jde o typ československé tramvaje vyráběné od roku 1962 do 1997, kterých se vyrobilo přibližně 14 000 kusů. Tatra T3 musela projít už spousty rekonstrukcemi a modernizacemi kvůli prodloužení životnosti a snížení provozních nákladů. Slavná T3 je na obrázku 13 a zrovna jezdí jako linka 17 v Praze. [31] [32]



Obrázek 13: Tatra T3 v Praze [32]

6.2 Stejnosemřný motor cize buzený

Stejnosemřný motor cize buzený je druhý typ stejnosemřného motoru. Odlišnosti od sériového motoru je možno vidět na náhradním schématu na obrázku 14. Cize buzený motor má budící vinutí napájené z jiného zdroje než vinutí kotvy. Cize buzený motor má oproti sériovému tvrdou otáčkovou charakteristiku, proto malé změny napětí způsobují při konstantním buzení velké změny proudu, tím i spjaté změny momentu. Proto se musí plynule řídit napětí jak v obvodu kotvy, tak v obvodu buzení. Oproti sériovému motoru nelze řídit stupňovitou změnou napětí. Výhoda oproti sériovému je možnost brždění rekuperací a snadná regulace rychlosti. [29] [33]



Obrázek 14: Náhradní schéma cize buzeného motoru [33]

Příkladem vozidla, které pohání tento typ motoru je česká lokomotiva Škoda řady 163 (obrázek 15), kterou pohánějí čtyři stejnosemřné šestipólové cize buzené motory a byla vyráběna od roku 1984 do 1992 s maximální rychlostí 140 km/h. [30] [34]



Obrázek 15: Lokomotiva Škoda řady 163 [34]

6.3 Asynchronní motory

Asynchronní motory jsou v dnešní době nejpoužívanějšími a nejrozšířenějšími elektromotory vůbec. Jejich oblíbenost se odvíjí od pozitivních vlastností, kterými jsou hlavně jednoduchá konstrukce bez komutátoru a dále v současné době poměrně nízká cena. Také jejich spolehlivost je vyšší a údržba oproti ostatním elektromotorům nejlevnější. Mezi nevýhody patří horší regulace rychlosti a velký proudový ráz při rozběhu, který se nejrůznějšími způsoby snaží omezovat. Možnost používání asynchronních motorů dovolil až vývoj vypínatelných polovodičových součástek, jež právě dovolily plynulou a hospodárnou regulaci otáček motoru. V trakci se používají třífázové asynchronní motory s kotvou nakrátko, napájené z měničů proměnným napětím a kmitočtem. [35] [29]

Celkem osm třífázových asynchronních elektromotorů o hmotnosti téměř 1700 kg zabezpečuje pohon Pendolina. Cena jedné soupravy, která se skládá ze 7 vozů, se pohybuje kolem 700 milionů korun a ČD jich vlastní celkem 7. Možná maximální rychlost je až 230 km/h, bohužel na českých tratích zatím provozní rychlost je 160 km/h. Na obrázku 16 je Pendolino vyfoceno na Podbabě v Praze. [34]



Obrázek 16: Pendolino 680 [34]

6.4 Synchronní motory

Uplatnění synchronních motorů v elektrické trakci přinesla až aplikace permanentních magnetů ze vzácných zemin. PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) je zkratka právě pro synchronní motory s permanentními magnety. Permanentní magnety jsou vyráběny ze dvou speciálních slitin. První je slitina neodymu, železa a bóru. Druhá slitina je na bázi prvků samaria a kobaltu. Velkou nevýhodou těchto slitin je ztráta magnetických vlastností při vyšší teplotě. U magnetu SmCo je kritická teplota okolo 300 °C a u NdFeB dokonce třikrát menší. Proto se používá výkonné vodní chlazení, aby nebyla překročena kritická teplota. [36] [37]

Vyskytují se dva základní synchronní motory s PMSM magnety. S vnitřním rotorem a vnějším rotorem. V prvním případě je statorové vnutí uloženo v drážkách železného magnetického obvodu, obdobně jako u synchronního motoru. Rotor nese permanentní magnety. V druhém typu je stator obepínán rotorem s permanentními magnety. Tento typ se využívá v případech, kdy je motor připevněn přímo na konstrukci kola. Stator se tedy stává součástí osy kola a rotor součástí kola. Oba typy se řídí stejně. Při napájení se ve statoru vytvoří točivé magnetické pole, kde účinky jsou velmi podobné jako účinky otáčejícího se magnetu. Rychlost otáčení, kdy stator i rotor se otáčejí synchronně, lze regulovat změnou frekvence napájecího napětí statoru. Trakční synchronní motory jsou proto vždy napájeny z výkonových polovodičových měničů napětí s říditelnou výstupní frekvencí. [37]

V České republice najdeme vozidlo s tímto druhem pohonu v Praze. Od roku 2008 do února 2019 převzala 250 kusů tramvají T15 (obrázek 17) od plzeňské společnosti Škoda Transportation. Na každém ze šestnácti kol vozidla najdeme jeden PMSM s výkonem 45 kW. [36] [38]



Obrázek 17: Škoda T15 v Praze [38]

7 Řešení styku více napájecích systémů

Styk různých trakčních proudových soustav není jen v mezinárodní dopravě, vyskytuje se i u nás. Díky „rozdělené“ republice, se tento problém musí řešit také přímo na našem území na sedmi stykových místech. [1]

7.1 Styk odlišných trakčních elektrických soustav

V prvním řešení se užívá nezávislé trakce pomocí diesellové lokomotivy. Kdy ve stykových stanicích se přetahují lokomotivy. Stanice má zpravidla dvě kolejiště a trolejové vedení je rozdělené podélným neutrálním úsekem trakčního vedení. Systém funguje následovně: vlak přijíždějící z jedné trakční soustavy, například z 25 kV, 50 Hz, přejede setrvačností se staženými sběrači neutrální úsek, až se dostane pod vedení, v našem případě 3 kV. Následně diesellová lokomotiva odtáhne lokomotivu na střídavou trakci zpět na střídavou stranu a poté už připravená stejnosměrná lokomotiva může vlastní silou přijet k odstaveným vagónům. Tento způsob je velmi časově a finančně náročný. Ale takto se řešil styk například v železniční stanici Kutná Hora.

Druhý systém je jednodušší ve výměně lokomotiv, neboť se přepíná trolejové vedení. Tím pádem se lokomotivy vyměňují vlastní silou a odpadá potřeba diesellových lokomotiv. To velmi zmenšuje prostoje, ale kolejiště, trolejové vedení i zabezpečovací zařízení musejí být na tento způsob připraveny, což zvyšuje náklady. V dnešní době se už nevyplácí.

Poslední systém používá dvousystémové (vícesystémové) hnací lokomotivy. Tímto způsobem klesají náklady na pevné trakční zařízení a prostoje vlakům jsou nulové. Změny poháněcích soustav se řeší na mnoha úsecích mimo železniční stanice. Mezi odlišné trakční proudové soustavy se vkládá neutrální úsek, vlaky úsek projíždí setrvačností se staženými sběrači. Mezitím se lokomotiva přepojuje na druhou trakční soustavu. Délka neutrálního úseku musí být delší než dvojnásobek délky vlaku, řádově stovky metrů. [1] [39]

Řešení styku dvou různých trakčních proudových soustav se volí podle konkrétního případu. Obecně se ale dá říct, že se preferuje způsob použití vícesystémových lokomotiv. [1] [39]

7.2 Dvousystémové lokomotivy Českých drah

Do roku 1969 ČSD řešily problém s dvěma napájecími soustavami přepřaháním lokomotiv ve stanicích. Až nová lokomotiva typu ES 499.0 byla schopná jezdit na oba systémy. Maximální rychlost lokomotivy byla 160 km/h a využívala se na trati Praha – Bratislava, bohužel nebylo možno využít plný potenciál, díky zastaralé infrastruktuře. Až v roce 1976 vznikla nová lokomotiva ES 499.1 (363), kterou je možné vidět i dnes (obrázek 18). Byla to první lokomotiva s pulzní regulací na světě a vyhovovala tehdejší infrastruktuře a mohla se využít jak v osobní dopravě, tak i v nákladní.

Lokomotivy odebírají proud z trolejového vedení dvěma univerzálními pantografovými sběrači stejnými pro oba systémy, lišící se pouze přitlakem k troleji podle systému, jenž je zrovna používán. O výkon se starají čtyři stejnosměrně cize buzené motory s výkonem 870 kW. [19] [40]



Obrázek 18: Lokomotiva typu ES 499.1 (363) [34]

7.2.1 Stejnosměrná výzbroj

Jak už je napsáno výše polopantografické sběrače se musejí dát ovládat, neboť při provozu na stejnosměrnou soustavu je potřeba mnohem větší přitlak sběrače než na systém střídavý. Změna přitlaku je realizována změnou tlaku ve válci pohonu sběrače. Dnes se využívají polopantografy se třemi až čtyřmi smykadly, která jsou vyrobeny ze slitiny mědi, uhlíku a železa. [40]

Přivedený proud z trolejí sběračem je dále veden odpojovačem do strojovny lokomotivy. Na střeše lokomotivy se nacházejí dva odpojovače, jeden pro každý sběrač, a

jsou ovládány ručně. Odpojovač je sestaven jako otočná hlavice umístěná na izolátoru a má dva kontakty. Jeden slouží k uzemnění sběrače do kolejnic a druhý přivádí proud do strojovny. [40]

Ochrana proti úderu blesku zajišťuje tzv. bleskojistka. Při úderu blesku může dosahovat přepětí až mnoha kilovoltů. Bleskojistka tuto hodnotu dokáže snížit přibližně na 20 kV. Další snížení na přibližně 10 kV realizují ochranné kondenzátory. 10 kV je hodnota odpovídající zkušebnímu napětí stejnosměrných obvodů. [40]

Základní funkcí stejnosměrného hlavního vypínače je prosté odpojení nebo připnutí hlavních silových obvodů od napájecího systému. Hlavní vypínač musí vypnout lokomotivu i při poruše, a to hlavně zkratové proudy. Signál vypnutí dávají ochranné prvky nebo strojvedoucí. Kontakty vypínače jsou ovládány elektromagneticky, kde elektromagnet drží vypínač sepnut a vypnutí je realizováno pomocí pružin. U dvousystémových lokomotiv musí být hlavně zabráněné sepnutí vypínače stejnosměrného, když se lokomotiva nachází pod střídavým vedením a naopak. Tomu se zabrání zvednutím sběrače před sepnutím vypínače, kdy indikační obvod zajistí blokování nesprávného vypínače. [40]

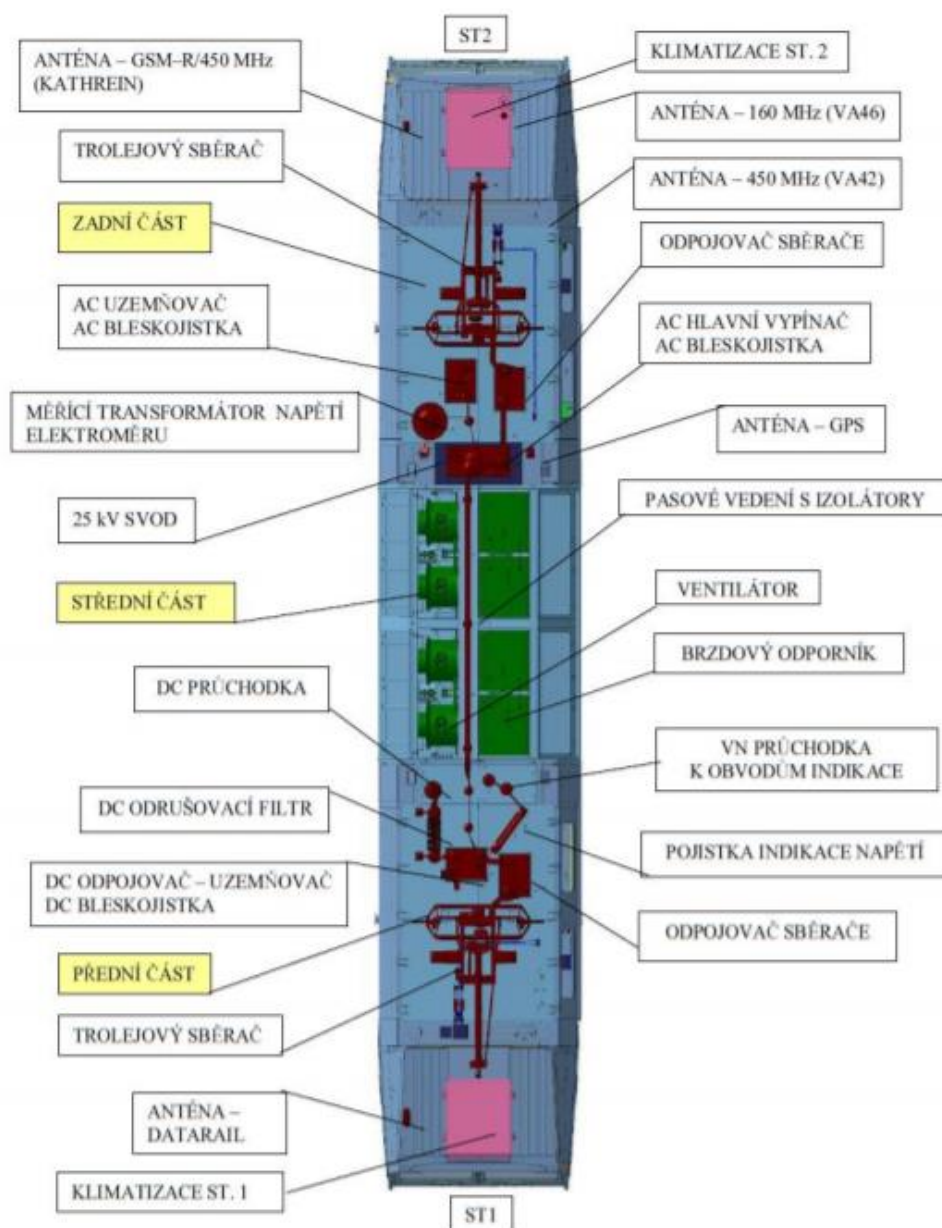
Posledním základním prvkem je trakční usměrňovač, který zajišťuje usměrnění odebíraného proudu z vedení v případě střídavého trakčního vedení. Je složen ze dvou sériově spojených můstků. Všechny diody jsou zatíženy odebíraným proudem, je-li lokomotiva na střídavém trakčním systému. Právě polovina můstků je zatížena na stejnosměrném systému a můstek pracuje jako blokovací člen proti vybíjení filtru C04 do trolejového vedení. [19] [40]

7.2.2 Střídavá výzbroj

Také střídavá část lokomotivy má hlavní vypínač. Funkce se neliší, ale odlišná je konstrukce a umístění. Jedná se o tlakovzdušný vypínač a obvykle je umístěn na střeše lokomotivy na keramických izolátorech a jeho pohon je umístěný ve strojovně pod střechou. Správná funkčnost vypínače je podmíněná výbavou vzduchojemem a kompresorem.

Dalším prvkem na střídavý systém je trakční transformátor. Trakční transformátor je u všech lokomotiv uložen co nejnižší, aby jeho vysoká váha neovlivňovala negativně těžiště. Jedná se o klasický transformátor s primárním a sekundárním vnutím. Kde primární vnutí je napájeno z trolejového vedení a sekundární vnutí je tvořeno z více vnutích, každé má jiný účel. Například napájení pomocných pohonů, topení nebo řídicích a trakčních obvodů. U moderních lokomotiv s pulzní regulací má transformátor pevně určený převod a je chlazen olejem s nuceným oběhem. [34] [40]

Na přiloženém obrázku 19 jsou ukázány jednotlivé části elektrické výbroje na střeše lokomotivy Škoda řady 363. [40]

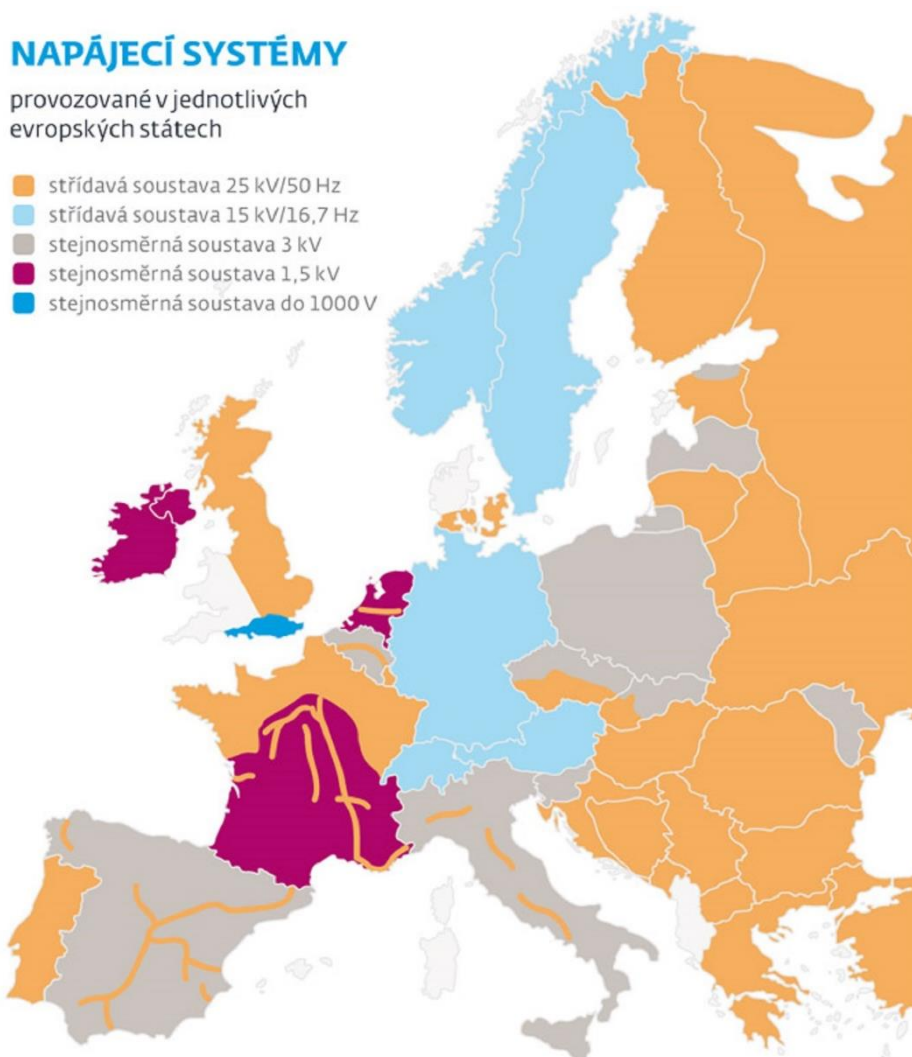


Obrázek 19: Dvousystémová lokomotiva řady 363, elektrická výbroj na střeše [40]

Dnes můžeme potkat i vícesystémové lokomotivy nebo tzv. elektrické soustavy, jako například 680 Pendolino vzniklo na objednávku ČD pro provoz na koridoru Berlín – Praha – Vídeň. Souprava dokáže jet na 3 kV DC, 15 kV AC a 25 AC. ČD Pendolina využívají na trase Františkovy Lázně – Košice. Tím pádem není plně využít potenciál soupravy. [34]

8 Přehled napájecích systémů v Evropě a v České republice

V současnosti se využívá celkem pět různých systémů pro napájení pro drážní dopravu. Systémy se dají rozdělit na dva základní druhy, stejnosměrný a střídavý. Na obrázku 19 je graficky znázorněno, kde se jaký systém používá. V ČR se jedná o 3 kV stejnosměrného napětí, které se využívá ještě například v Polsku, Itálii a na území Ruské federace. Druhý systém využívaný v ČR je střídavé napětí 25 kV, 50 Hz, jež se využívá v jižní části naší země a dále například v Turecku, Finsku, Chorvatsku atd. Dalším rozšířeným systémem využívaným například v Německu je 15 kV, 16 2/3 Hz. Dva nejméně používané systémy stejnosměrného napětí 750 V a 1,5 kV najdeme v části Anglie, potažmo v jižní části Francie. Některé země v Evropě se nenaklonily k elektrifikaci tratí a jsou závislé pouze na nezávislé elektrické trakci, například Albánie nebo Island. [8] [41]



Obrázek 20: Mapa napájecích soustav v Evropě [41]

V tabulce 2 je ukázané zastoupení jednotlivých napájecích systémů na železničních tratích. Stejnosemnné systémy mají stále velké zastoupení, hlavně díky Polsku, Španělsku a Itálii, kde většina tratí je napájeno stejnosměrnou soustavou 3 kV. Starší stejnosměrný systém 1,5 kV má už jen okolo 7 % zastoupení, a to hlavně díky Francii, která své jižní území napájí tímto systémem. Malé procento tratí je napájeno jinými soustavami, jako je například DC 750 V, v Anglii poměrně velmi využívané díky malým vzdálenostem mezi městy. Okolo 65 % všech elektrifikovaných tratí už přešlo na střídavé systémy. Větší procento zabírá podle Eurostatu napájení vyššího, 25 kV systému, ale ve statistice jsou státy jen Evropské unie. Švýcarsko má přes 3 tisíce tratí a takřka všechny jsou elektrifikovány soustavou AC 15 kV, 16 2/3 Hz. Hodně zemí neposkytlo informace, ale nejpoužívanější soustavou v celé Evropě je střídavá 25 kV, 50 Hz. [42]

Tab. 2: Přehled zastoupení železničních napájecích soustav v EU (2016)

Soustava	Délka tratě [km]	Procentuální zastoupení [%]
AC 25 kV, 50 Hz	40667	33,7
AC 15 kV, 16 2/3	35570	29,5
DC 3 kV	34257	28,4
DC 1,5 kV	8075	6,7
Ostatní	2136	1,8
Celkově	120731	100

[42]

8.1 Přehled elektrifikace v České republice

V České republice se nachází mnoho druhů napájecích soustav, ať už stejnosměrné nebo střídavé. Stejnosměrné díky své historii stále mají převahu, a i více modifikací oproti své konkurenci. Používají se jak na celé severní části území pro hlavní železniční tratě, tak i pro veškerou městskou hromadnou dopravu nebo i hlubinné důlní dráhy.

Uvádí se, že se v ČR používá v železniční dopravě pouze jeden střídavý systém, ale není to tak úplná pravda. Druhý přibližně 12 km dlouhý úsek Šatov – Znojmo je napájen střídavým systémem 15 kV, 16 2/3 Hz. Úsek je však napájen z Rakouska, proto se obvykle nezmiňuje.

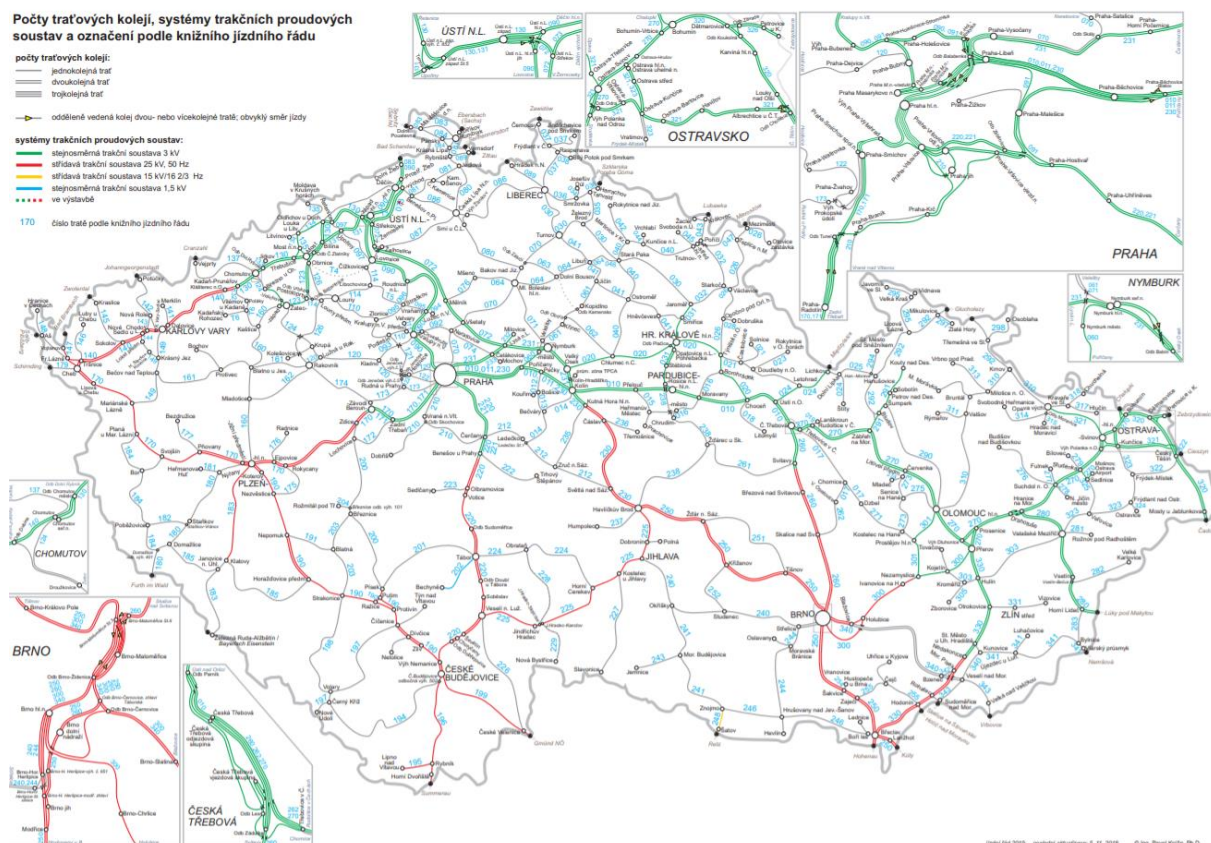
Ucelený přehled se nachází v tabulce 3. [43] [44]

Tab. 3: Hodnoty a druhy využívaných soustav v ČR

Použití	Soustava
Hlavní dálkové dráhy	3000 V DC
Průmyslové dráhy, Bechyně - Tábor	1500 V DC
Metro	750 V DC
Tramvaj, trolejbus	600 V DC
Důlní hlubinné dráhy	250 V DC
Hlavní dálkové dráhy	25 kV, 50 Hz AC
Šatov – Znojmo	15 kV, 16 2/3 Hz AC

[43]

Na přiloženém obrázku 21 se nachází podrobný přehled všech železničních tratí, které jsou elektrifikované. Lze vidět, že dva hlavní napájecí systémy téměř úměrně rozdělují naše území na severní a jižní část. [45]



Obrázek 21: Železniční trakce v ČR [45]

Přehled napájecích soustav v ČR:

Celková délka tratí:	9 580 km	100 %
Tratě stejnosměrné soustavy 3 kV:	1818 km	19 %
Tratě střídavé soustavy 25 kV, 50 Hz:	1381 km	14,4 %
Trať stejnosměrné soustavy 1,5 kV:	24 km	0,003 %
Trať střídavé soustavy 15 kV, 16 2/3 Hz	14 km	0,002 %
Celková délka elektrifikovaných tratí:	3 237 km	33,405 % [42]

V České republice se nachází okolo 32 % elektrifikovaných tratí. Ve srovnání s okolními státy je elektrifikace poměrně na malém procentu tratí, pro příklad Slovensko má 44 %, Německo 54 %, Polsko 59 % a Rakousko 69 % a ve Švýcarsku téměř 100 %. [46]

8.1.1 Budoucnost elektrifikace železnic v ČR

Ministerstvo dopravy ČR chce do třiceti let sjednotit napájecí soustavy českých železnic. Ze studie, kterou provedly společnosti Sudop Praha a Sudop Brno, vyplývá, že nejlepším řešením je přechod na střídavé napětí 25 kV, 50 Hz. Jeden z důvodů přechodu na jednotný systém je, že více systémů je velikou překážkou v rozvoji železniční nákladní dopravy. [47] [48]

Tato inovace bude vyžadovat značné investici, téměř 79 miliard korun. Tato suma zahrnuje náklady na modernizaci tratí, které by stejně musely proběhnout, a navíc je jen o něco vyšší, než náklady na pravidelnou obnovu stejnosměrné soustavy při jejím zachování a posílení pro splnění současných a budoucích požadavků. Ty činí 70,8 miliard korun. Další náklady bude představovat obnova vozového parku, se kterou se i přesto počítalo. Prvním úsekem, kde přijde k přepnutí, by měl být Nedakonice – Říkovice v roce 2019. [47] [48]

Autoři studie uvádějí, že úspora energie by se pohybovala kolem 30 %, kde podle spotřeby za rok 2015 ušetřená částka se pohybovala kolem 588 milionů korun. [47]

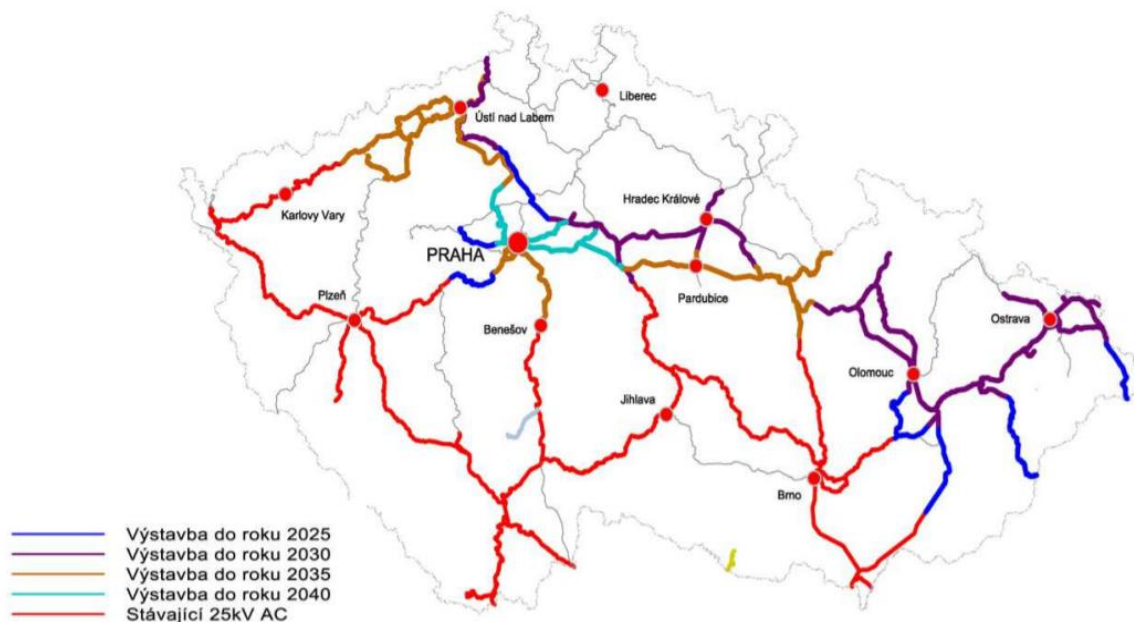
Téma přepínání stejnosměrného systému na střídavou soustavu 25 kV, 50 Hz je otázkou jen pár let. Studie od společností Sudop jsou dost jednoznačné a hovoří hlavně o výhodách. Jednou z hlavních je bez pochyby úspora energie. Střídavý systém má nižší ztráty při přenosu energie z napájecích stanic k lokomotivám, nižší ztráty při zpětném přenosu rekuperované energie a vyšší úspěšnost rekuperačního brzdění. Úspora energie by byla o 30 %. Do budoucna, jestliže se uskuteční plány Ministerstva dopravy o vybudování vysokorychlostních tratí vedené mimo jiné k městům Praha, Přerov a Ostrava, jež jsou napájena stejnosměrným napětím 3 kV, tak je to na tomto systému nereálné. Neboť při rychlostech okolo 300 km/h jsou potřeba vysoké výkony, a to stejnosměrné soustavy nejsou schopny zajistit. [1]

V České republice se nachází celkově sedm stykových míst soustav DC 3 kV a AC 25 kV, 50 Hz:

- Kadaň
- Králův Dvůr
- Benešov
- Kutná Hora
- Svitavy
- Nezamyslice
- Nedakonice

Přepnutím na jednotný systém napájení, by tyto styková místa vypadla a tím by se zrušil problém s návazností jak na našem území, tak i v mezinárodní přepravě. [1]

Plán přepínání by měl podle studie začít už v roce 2020 a to na hranicích se Slovenskou republikou, poté postupně na celé severní části území, a až na konci roku 2040 by mělo přejít také okolí Prahy na střídavý systém. Přehled jde vidět na obrázku 22. [1]



Obrázek 22: Mapa postupu přepínání na AC 25 kV, 50 Hz [1]

Podle usnesení vlády č. 978/2015 se do roku 2030 minimálně 30 % nákladní dopravy má převést na železnice, to znamená větší vytížení železniční dopravy. A také v dalším usnesení vlády ČR č. 362/2015 se má v rozmezí let 2015–2030 snížit spotřeba ropných paliv z 59 miliard kWh/rok na 50 miliard kWh/rok, ale zvýšit použití elektrické energie v dopravě z 2,4 miliard kWh/rok na 4,3 miliard kWh/rok. Což je velký krok k využití elektrického potenciálu. A ušetření silniční dopravě jako takové. Určitě se nedá zbavit kolon kamionů na dálnicích, ale zmenšení počtu nákladních vozidel snad ano. Jeden z velkých problémů je obsazenost železniční sítě, neboť už v dnešní době mezi osobní dopravu přidat větší množství nákladních vlaků je problém. [1]

8.2 Výpočet ztrát

Přenosová schopnost vedení na určitou vzdálenost je definována poměrem ztrát výkonu k přenášenému výkonu:

$$p = \frac{\Delta P}{P} = \frac{R \cdot I^2}{U \cdot I} = \frac{R \cdot P}{U^2} \quad (5)$$

p ... poměrné ztráty přenosem energie [W]

ΔP ... ztráty přenosem energie [W]

P ... přenášený výkon [W]

R ... odpor vedení [Ω]

U ... napětí [V]

I ... proud [A]

Při dosazení do předešlého vzorce po úpravě lze zjistit rozdíl ztrát při přechodu z napětí 3 kV na 25 kV na stejnou vzdálenost:

$$\frac{P_{DC}}{P_{AC}} = \frac{\frac{R \cdot P}{U_{DC}^2}}{\frac{R \cdot P}{U_{AC}^2}} = \frac{U_{AC}^2}{U_{DC}^2} = \frac{25^2}{3^2} = 8,32^2 = 69 \quad (6)$$

To znamená, že ve střídavém systému 25 kV jsou 69x menší ztráty než ve stejnosměrném systému 3 kV. [1]

8.2.1 Výpočet pro stejnou vzdálenost 10 km

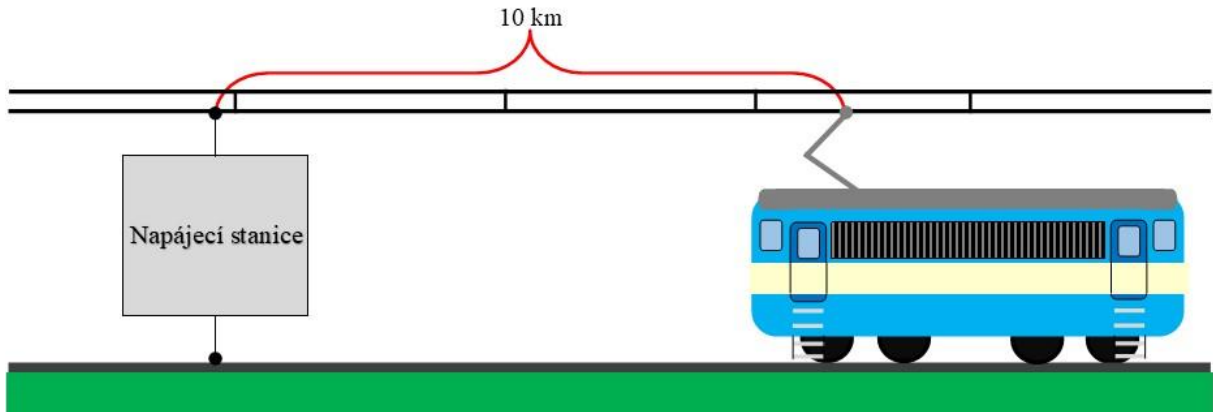
Předešlý výpočet byl velmi zjednodušený, kde se zanedbával měrný odpor vedení a délky mezi napájecí stanicí a lokomotivou. V tabulce 4 nalezneme měrné odpory vodičů využívaných v elektrické železniční dopravě, závislé na tloušťce. Pro střídavý systém vybereme 100 mm² a pro stejnosměrný 150 mm². [49]

Tab. 4: Odpor měděného vodiče

Průřez [mm ²]	80	100	107	120	150
Odpor [Ω /km]	0,229	0,183	0,171	0,153	0,122

[49]

První výpočet, který byl proveden, kdy budou lokomotivy od napájecí stanice na obou systémech stejně daleko, a to 10 km, jak je ukázáno na obrázku 23. Lokomotiva bude mít výkon 3 MW. Tím pádem podle vzorce 1 lze vypočítat proud, který je potřeba přivést na pantograf. U střídavého systému hodnota vyjde 120 A a u stejnosměrném dokonce 1000 A.



Obrázek 23 Vzdálenost 10 km od napájecí stanice [vlastní tvorba]

$$\text{AC: } R_{A 100 \text{ mm}^2} = 0,183 \text{ } \Omega/\text{km} \Rightarrow 1,83 \text{ } \Omega / 10 \text{ km} \quad (7)$$

$$\text{DC: } R_{D 100 \text{ mm}^2} = 0,122 \text{ } \Omega/\text{km} \Rightarrow 1,22 \text{ } \Omega / 10 \text{ km} \quad (8)$$

$$\text{AC: } \Delta P_A = R_A \cdot I_A^2 = 1,83 \cdot 120^2 = 26,35 \text{ kW} \quad (9)$$

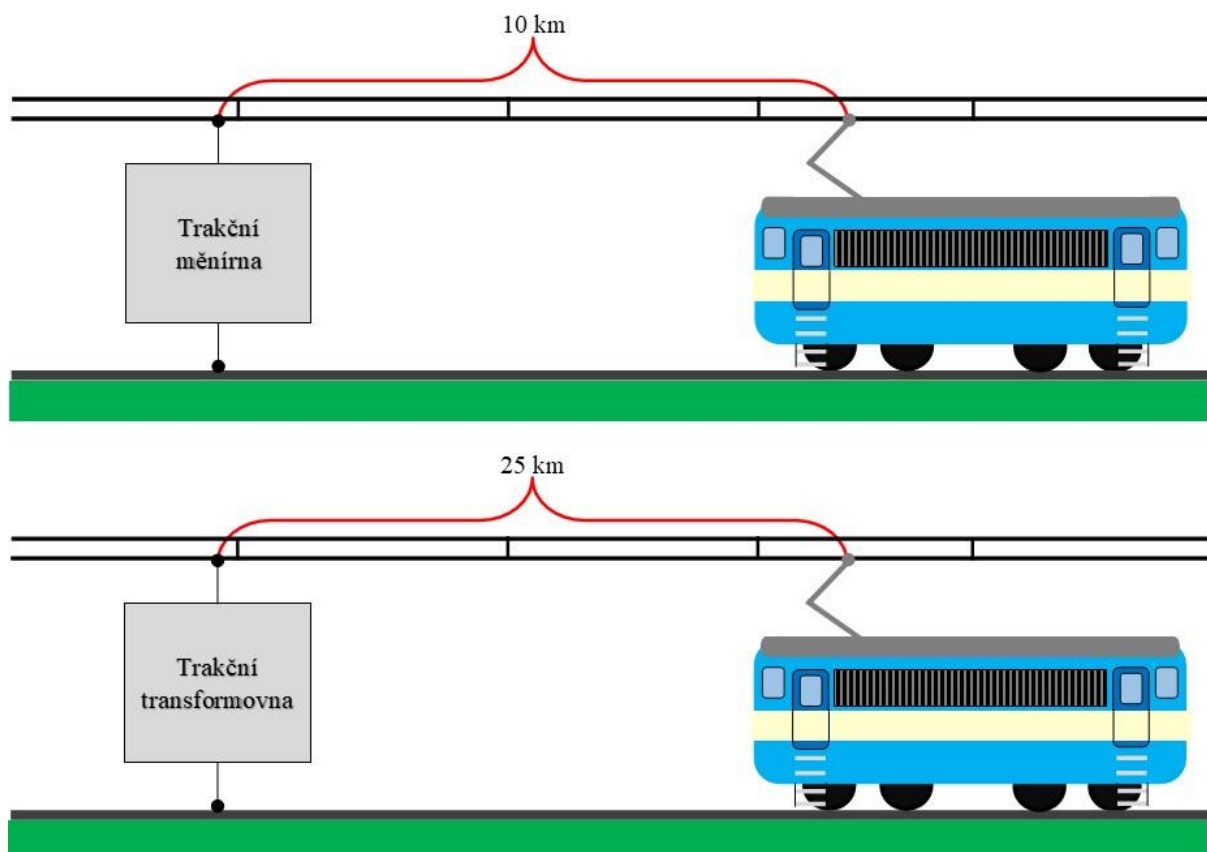
$$\text{DC: } \Delta P_D = R_D \cdot I_D^2 = 1,22 \cdot 1000^2 = 1220 \text{ kW} \quad (10)$$

$$\Delta P = \frac{1220 \text{ kW}}{26,35 \text{ kW}} = 46,3 \Rightarrow 46\text{x menší ztráty} \quad (11)$$

Když se lokomotivy nacházejí 10 km od napájecích stanic, tak při střídavém systému dle rovnice 11 jsou 46x menší ztráty. Dalším zajímavým číslem je ztráta stejnosměrného vedení na 10 km; 1,22 MW je více než třetina výkonu lokomotivy, která se pohybuje na trati.

8.2.2 Výpočet pro průměrnou vzdálenost 10 a 25 km

Druhý výpočet už bere na zřetel i průměrnou vzdálenost napájecích stanic, kde ve střídavém systému se pohybuje vzdálenost trakčních transformoven okolo 50 km a u stejnosměrného trakční měničů cca 20 km. Proto byly použity vzdálenosti uprostřed vzdáleností 10 a 25 km, jak lze vidět na obrázku 24.



Obrázek 24 Průměrné vzdálenosti mezi napájecími stanicemi [vlastní tvorba]

$$\text{AC: } R_{A 100 \text{ mm}^2} = 0,183 \text{ } \Omega/\text{km} \Rightarrow 4,575 \text{ } \Omega / 25 \text{ km} \quad (12)$$

$$\text{DC: } R_{D 100 \text{ mm}^2} = 0,122 \text{ } \Omega/\text{km} \Rightarrow 1,22 \text{ } \Omega / 10 \text{ km} \quad (13)$$

$$\Delta P_A = R_A \cdot I_A^2 = 4,575 \cdot 120^2 = 65,88 \text{ kW} \quad (14)$$

$$\Delta P_D = R_D \cdot I_D^2 = 1,22 \cdot 1000^2 = 1220 \text{ kW} \quad (15)$$

$$\Delta P = \frac{1220 \text{ kW}}{65,88 \text{ kW}} = 18,5 \Rightarrow 18,5\text{x menší ztráty} \quad (16)$$

V tomto případě z rovnice 16 vyjdou ztráty 2,5 menší než v předchozím výpočtu díky větší vzdálenosti trakčních transformoven. Ale ani 18,5 krát menší ztráty není zanedbatelné číslo.

9 Závěr

Elektrická trakce, dělí se na dva základní systémy, stejnosměrný a střídavý, prochází neustálým vývojem. Stejnosměrné systémy sníženého napětí mají velké využití v městských hromadných dopravách, kde není potřeba velkého výkonu vozidel a instalace vysokého napětí do měst by byla problematická. Ale na hlavních tratích jsou velmi nevýhodné kvůli ztrátám ve vodičích a nepokrytí energetické náročnosti pro dnešní moderní lokomotivy. V těchto případech je výhodnější použití vyššího střídavého napětí.

Díky provedeným výpočtům je dokázána výhodnost střídavého systému 25 kV, 50 Hz oproti stejnosměrnému 3 kV. Když se vezme průměrná vzdálenost napájecích stanic, tak vyjde 18,5x větší ztráta stejnosměrného napětí. Což je velmi vysoké číslo, a je dobře, že Ministerstvo dopravy ČR už letos, v roce 2019, má v plánu přepnout první úsek tratě Nedakonice – Říkovice na střídavý systém.

Přechod na jednotný systém nese s sebou vysoké náklady, ale nejsou o moc vyšší, než co by stála údržba dnešní stejnosměrné soustavy. Mohlo by se zdát, že další náklady přinese obnova lokomotiv, ale v dnešní době je i většina osobních lokomotiv vícesystémových. Nákladní lokomotivy jsou vesměs pouze jednosystémové, ale hodně z nich jsou již zastaralé. Tím pádem musí i tak projít renovací.

Elektrická trakce zavedená v železniční dopravě velmi pozitivně přispěla k lepší účinnosti motorů, neboť klasické spalovací motory mají účinnost pouze okolo 30 %, ale elektromotory dosahují účinností přes 90 %. Navíc se přispěje k úspoře fosilních paliv. Bohužel i elektrická energie se vyrábí stále v uhelných elektrárnách.

Elektrická trakce v hromadné dopravě velmi pozitivně přispívá k lepšímu prostředí ve větších aglomeracích. Bohužel šla v minulosti některé města proti tomuto trendu, jako například Praha, a v dnešní době se pracně vrací zpět. Hojně se také začínají používat nové trolejbusy nebo elektrobusy, které jsou poháněny bateriemi a trolejové vedení využívají jen na konkrétních úsecích na dobití.

10 Literatura

- [1] PEROUTKA, Jaroslav a Petr LAPÁČEK. *Koncepce přechodu na jednotnou napájecí soustavu ve vazbě na priority programového období 2014-2020 a naplnění požadavků TSI ENE* [online]. b.r. [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: <https://www.vlaky.net/upload/images/reports/006516/Podklad.pdf#page=1>
- [2] JANSÁ, František. *Napájení elektrických drah*. Bratislava, 1982. Vysoká škola dopravy a spojov v Žilině.
- [3] OPAVA, Jaroslav. *Století elektrických drah: ke 100. výročí zahájení provozu elektrické dráhy z Tábora do Bechyně*. Vyd. 1. Plzeň: Pro KPM Consult vydalo Nakladatelství dopravy a turistiky, 2003. ISBN 80-7270-019-7.
- [4] *Sdružení dopravních podniků ČR* [online]. b.r. [cit. 2019-03-19]. Dostupné z: <http://www.sdp-cr.cz/>
- [5] MOLEK, Tomáš. *Elektrifikace českých železnic* [online]. b.r. [cit. 2019-03-19]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/technologie/elektrifikace-ceskych-zeleznic/>
- [6] JANSÁ, František. *Vozidla elektrické trakce: Elektrická zařízení kolejových hnacích vozidel*. 2. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1987.
- [7] *Provozní dráhy SŽDC* [online]. b.r. [cit. 2019-03-19]. Dostupné z: <http://provoz.szdc.cz/portal/ViewArticle.aspx?oid=594598>
- [8] DOLEČEK, Radovan a Ondřej ČERNÝ. *Trakční napájecí soustavy: studijní opora*. Vyd. 1. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2015. ISBN 978-80-7395-881-7.
- [9] HLAVA, Karel. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) drážních zařízení*. Vyd. 1. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2004. ISBN 80-7194-637-0.
- [10] *Vědeckotechnický sborník českých drah*. Praha: Generální ředitelství Českých drah, 1995-2004, **1999**(8). ISSN 1211-2321.
- [11] MORAVEC, František. *Elektrické stroje netočivé – transformátory*. Mělník: Integrovaná střední škola technická Mělník, 2012.
- [12] FEJT, Jiří a Jiří RÝDLO. *Střídavá trakce*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1969.
- [13] PEROUTKA, Jaroslav. *Koncepce přechodu na jednotnou napájecí soustavu – Úvod*. SUDOP Brno, 2016.

- [14] KUMAR JAIN, Mahesh. *RailElectrica: 2×25 kV Traction System* [online]. b.r. [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://www.railelectrica.com/traction-distribution/2x25-kv-traction-system/>
- [15] *Elektrické distribuční systémy pro napájení elektrických drah* [online]. b.r. [cit. 2019-03-22]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/18324712-Elektricke-distribucni-systemy-pro-napajeni-elektricky-drah.html>
- [16] *BVG* [online]. b.r. [cit. 2019-03-22]. Dostupné z: <https://www.bvg.de/en>
- [17] *Přívodní napájecí kolejnice metra* [online]. b.r. [cit. 2019-03-22]. Dostupné z: <https://www.metroweb.cz/metro/TECH/kolejnice.htm>
- [18] *Technické muzeum v Brně: Historický vývoj tramvajové dopravy v Brně* [online]. b.r. [cit. 2019-03-22]. Dostupné z: <http://www.sabdigital.com/expozicemhd/?akce=doprava-v-brne-tramvaje-v-brne-historie-tramvaji>
- [19] JANSÁ, František. *Vozidla elektrické trakce: elektrická zařízení kolejových hnacích vozidel*. 1. vyd. Praha: Nadas, 1983. Knižnice nové techniky a technologie železniční dopravy.
- [20] KUBÁT, Bohumil a Miroslav PENC. *Městská kolejová doprava*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80–01–02117–3.
- [21] *Tramvajová trakce* [online]. b.r. [cit. 2019-03-22]. Dostupné z: http://www.mhdostrava.cz/?s=tramvajova_trakce
- [22] *Historie trolejbusů* [online]. b.r. [cit. 2019-03-22]. Dostupné z: http://www.trolejbusyvpraze.net/tb_historie.htm
- [23] BARCHÁNEK, Jan. *DP kontakt: Dynamický elektrobus nebo parciální trolejbus?* [online]. b.r., , 20-21 [cit. 2019-03-11]. Dostupné z: <http://www.dpp.cz/download-file/15272/novy-soubor.pdf>
- [24] *Z autobusu trolejbusem a zase zpátky. V Praze vyrostla kilometrová trať* [online]. b.r. [cit. 2019-03-11]. Dostupné z: <https://ct24.ceskatelevize.cz/regiony/2271196-autobus-vestoupani-zvedne-pantograf-praha-oprasuje-zaslou-slavu-trolejbusu>
- [25] *MHD86.cz* [online]. b.r. [cit. 2019-03-19]. Dostupné z: <http://mhd86.cz/2019/02/11/hybridni-volvo-vyzkouseno-tichy-elektrobus-kteremu-pomaha-nafta/>

- [26] DANZER, Jiří. *Elektrická trakce I*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-633-9.
- [27] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. ISBN 978-80-7043-444-4.
- [28] *Trakční motory* [online]. b.r. [cit. 2019-02-25]. Dostupné z: <http://www.skoda.cz/cs/produkty/trakcni-motory/>
- [29] DANZER, Jiří. *Elektrická trakce I*. Plzeň, 2009. Západočeská univerzita v Plzni.
- [30] BAŠTA, Jan, Jaroslav CHLÁDEK a Imrich MAYER. *Teorie elektrických strojů*. 1. Praha: SNTL, 1968.
- [31] DOLEJŠÍ, Milan. *Tramvaje T3: V práci jsou 50 let, v důchodu však jen jednou nohou*. [online]. b.r. [cit. 2019-03-24]. Dostupné z: <http://www.ceskatelevize.cz/ct24/regiony/203637-tramvaje-t3-v-praci-jsou-50-let-v-duchodu-vsak-jen-jednou-nohou/>
- [32] *T3, T3SUCS* [online]. In: . b.r. [cit. 2019-02-25]. Dostupné z: <http://prahamhd.vhd.cz/Tramvaje/T3.htm>
- [33] ZEMAN, Karel. *Elektrické pohony-výtah z přednášek 2013*. b.r.
- [34] *Atlas Lokomotiv* [online]. b.r. [cit. 2019-03-24]. Dostupné z: <http://www.atlaslokomotiv.net/list.php>
- [35] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. ISBN 978-80-7043-444-4.
- [36] ČERNÝ, Ondřej, Radovan DOLEČEK a Jaroslav NOVÁK. *Vědeckotechnický sborník ČD č. 29/2010: Synchronní motory s permanentními magnety pro trakční pohony kolejových vozidel* [online]. b.r. [cit. 2019-03-24]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/17511604-Synchronni-motory-s-permanentnimi-magnety-pro-trakcni-pohony-kolejovych-vozidel.html>
- [37] OSAWA, Mitsuyuki. *Toward creation of a railway car meeting the 21st-century requirements: JR East Technical Review Japan*. b.r.
- [38] *Eurozpravy.cz: V Praze je první plně nízkopodlažní tramvaj T15 ForCity* [online]. 2009 [cit. 2019-03-24]. Dostupné z: <https://eurozpravy.cz/doprava/mhd/2447-v-praze-je-prvni-plne-nizkopodlazni-tramvaj-t15-forcity/>

- [39] LANÁKOVÁ, Gabriela a Dalibor ŠINDLER. *Napájení elektrických dráh*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1989.
- [40] BIERHANZL, Václav, Martin SYCHRA a Václav BOHUSLAV. *Návod k obsluze dvousystémové elektrické lokomotivy: ŠKODA 71 Em, ČD 363.5* [online]. b.r. [cit. 2019-03-24]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/6854773-Navod-k-obsluze-dvousystemove-elektricke-lokomotivy.html>
- [41] RUBEŠ, Václav. *Železničář: Evropa pod měděnou pavučinou aneb souboj střídavého a stejnosměrného proudu* [online]. b.r. [cit. 2019-03-24]. Dostupné z: [https://zeleznicar.cd.cz/zeleznicar/tema/evropa-pod-medenou-pavucinou-aneb-souboj-stridaveho-a-stejnosmerneho-proudu/-10558/19,0,/,/](https://zeleznicar.cd.cz/zeleznicar/tema/evropa-pod-medenou-pavucinou-aneb-souboj-stridaveho-a-stejnosmerneho-proudu/-10558/19,0,/)
- [42] Eurostat [online]. b.r. [cit. 2019-03-24]. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/transport/data/database>
- [43] MATOUCH, Zdeněk a Jiří PRINC. *Trakční energetika: učebnice pro 4. ročník středních průmyslových škol, obor 37-42-6 Elektrická trakce a kolejová vozidla v železniční dopravě*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1974.
- [44] *Železniční mapy ČR* [online]. b.r. [cit. 2019-02-26]. Dostupné z: <https://www.szdc.cz/o-nas/zeleznicni-mapy-cr.html>
- [45] *Správa železniční dopravní cesty* [online]. b.r. [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: <https://www.szdc.cz/o-nas/zeleznicni-mapy-cr.html>
- [46] HILLMANSEN, Stuart a Rod ELLIS. *Electric railway traction systems and techniques for energy saving* [online]. b.r. [cit. 2019-03-24]. Dostupné z: <https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2014.1432>
- [47] SŮRA, Jan. [online]. b.r. [cit. 2019-01-21]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/ekonomika/domaci/ceske-zeleznice-vlakly-elektrifikace-ministerstvo-dopravy.A170118_220516_ekonomika_fka
- [48] HARÁK, Martin. *Napájecí soustavy na železnici se sjednotí* [online]. b.r. [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://zeleznicar.cd.cz/zeleznicar/hlavni-zpravy/napajeci-soustavy-na-zeleznici-se-sjednoti/-13976/17,0,/,/>
- [49] *Napájení elektrifikovaných tratí*. *Technická univerzita Ostrava* [online]. b.r. [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~s1i95/phv/PDP_energetika_1.pdf

11 Seznam obrázků

Obrázek 1: Princip napájení DC vlevo a AC tratě vpravo [7]	8
Obrázek 2: Schéma trakčního usměrňovače [9].....	11
Obrázek 3: Transformační poměr [11].....	14
Obrázek 4: Mapy rekuperace v ČR [7]	15
Obrázek 5: Koncepce napájení trakčního vedení u ČD: "V" a "T" schéma [9].....	16
Obrázek 6: Pozemní vedení 2 AC 25 kV, 50 Hz [14].....	18
Obrázek 7: Napájení metra přes třetí kolejnici [vlastní tvorba].....	20
Obrázek 8: Schéma napájení městských elektrických drah [15]	21
Obrázek 9: Napájení tramvaje [vlastní tvorba]	22
Obrázek 10: Napájení trolejbusů [vlastní tvorba].....	23
Obrázek 11: Elektrické trolejbusy / elektrobusy [23]	24
Obrázek 12: Náhradní schéma stejnosměrného sériového motoru [29]	26
Obrázek 13: Tatra T3 v Praze [32].....	26
Obrázek 14: Náhradní schéma cize buzeného motoru [33]	27
Obrázek 15: Lokomotiva Škoda řady 163 [34].....	27
Obrázek 16: Pendolino 680 [34]	28
Obrázek 17: Škoda T15 v Praze [38]	29
Obrázek 18: Lokomotiva typu ES 499.1 (363) [34]	31
Obrázek 19: Dvousystémová lokomotiva řady 363, elektrická výzbroj na střeše [40] ..	33
Obrázek 20: Mapa napájecích soustav v Evropě [41].....	34
Obrázek 21: Železniční trakce v ČR [45]	37
Obrázek 22: Mapa postupu přepínání na AC 25 kV, 50 Hz [1].....	39
Obrázek 23 Vzdálenost 10 km od napájecí stanice [vlastní tvorba]	41
Obrázek 24 Průměrné vzdálenosti mezi napájecími stanicemi [vlastní tvorba]	42