

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
K13115 – Katedra elektroenergetiky**



SYSTÉMOVÉ ŘEŠENÍ NAPÁJENÍ TRAKČNÍCH VOZIDEL

Diplomová práce

Bc. Vojtěch HRDLOVICS

Praha, 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hrdlovice** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **393311**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Systémové řešení napájení trakčních vozidel

Název diplomové práce anglicky:

Pokyny pro vypracování:

1. Rozdělení železničního systému na jednotlivé subsystémy.
2. Kompatibilita trakčních a zabezpečovacích zařízení.
3. Koncepční řešení a návrh komponent přívodu proudu trakčního vozidla.
4. Koncepční řešení a návrh komponent zpětné cesty proudu trakčního vozidla.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Steimel Andreas: Electric Traction-Motive Power and Energy Supply Basic and Practical Experience, 2. dopl. vyd. Munchen: Deutscher Industrieverlag GmbH, 2014, 416 s. ISBN 978-3835672574
- [2] Fejt Jiří, Rydlo Jiří: Střídavá trakce 1. vydání Praha Nadas, 1969, 288 s. ISBN nepřiděleno.
- [3] Doleček Radovan, Černý Ondřej: Trakční napájecí soustavy, Studijní opora Pardubice UP 2015, ISBN 978-80-7395-879-4
- [4] Peroutka Jaroslav, Lapáček Petr: Jednotná napájecí soustava v Česku, SUDOP revue 2016, 2016(4) s 22-23.
- [5] Ogunsola Ade, Mariscotti Andrea: Electromagnetic Compatibility in Railways- Analysis and Management, Berlin, Springer Verlag, 2013, 527 s. ISBN 978-3-642-30280-0
- [6] ČSN 342613, ed 3: Železniční zabezpečovací zřízení- Kolejové obvody a vnější podmínky pro jejich činnost. Praha ÚNMZ, 2014
- [7] ČSN EN 50388 ed. 2. Drážní zařízení- Napájení a drážní vozidla- Technická kritéria. Praha ÚNMZ, 2013

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

prof. Ing. Josef Tlustý CSc., katedra elektroenergetiky FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **22.09.2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **26.05.2017**

Platnost zadání diplomové práce: **28.02.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení:

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

V Praze dne 25. 5. 2017

.....

Podpis autora

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat zejména svému vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Josefu Tlustému, CSc. za odborné vedení, přínosné podněty, a především za věnovaný čas při konzultacích této práce. Děkuji i odborníkům ze společnosti SIEMENS, s.r.o., jmenovitě panu Ing. Jiřímu Pohlovi, za ochotu, cenné rady i poskytnuté studijní materiály. Poděkovat za podporu bych chtěl rovněž i své rodině a přátelům.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem systémového řešení napájení elektrické jednotky pro příměstskou a regionální dopravu. V úvodu je uvedeno základní rozdělení železničního systému a krátce je rovněž nastíněna legislativní struktura v drážní oblasti. Následně práce zmiňuje konkrétní normativní požadavky, týkající se jednotlivých železničních subsystémů – od oblasti napájení, přes zabezpečovací systémy, až po samotná drážní vozidla.

V druhé části práce je pak prezentován návrh napájení dvousystémové elektrické jednotky. Nejprve jsou shrnuty uvažované technické parametry a také naznačena prostorová dispozice vozidla. Další část textu je poté věnována samotnému návrhu komponent střídavé a stejnosměrné části vysokonapěťového rozvodu. Oddíl obsahuje schéma zapojení silové části a základní dimenzování jednotlivých komponent. Uveden je vždy i příklad výběru konkrétních součástí. Na závěr práce je pak stručně zmíněna i problematika vedení zpětného proudu a uzemňování, která je se systémem napájení vozidel těsně provázána.

Klíčová slova

Železnice, napájení železnic, zabezpečovací systémy na železnici, kompatibilita, železniční vozidlo, elektrická jednotka, napájení vozidla, vysokonapěťové komponenty, dimenzování, zpětná cesta proudu.

Abstract

The master's thesis deals with the design of the power supply of an electric multiple unit for suburban and regional transport. The first part of the thesis describes the basic division of the railway system and briefly outlines the legislative structure in the railway area. The following part focuses on a description of the specific normative requirements concerning the individual railway subsystems – from the power supply system, through the railway signaling equipment to the rolling stock itself.

The aim of the second part is to present the design and the basic dimensioning of the high-voltage components of the electric multiple unit. At the beginning of this section, the technical parameters and the space layout of the selected rolling stock are summarized. The following part is dedicated to the design of the individual components of the AC and DC high voltage roof equipment. At the same time an example of a possible real product is presented for each component. In the conclusion of the thesis there is also a brief mention about the return current issue and the grounding concept, which are tightly connected with the power supply system of a rolling stock.

Key words

Railway, railway power supply system, railway signaling equipment, compatibility, rolling stock, electric multiple unit, power supply of rolling stock, high-voltage components, dimensioning, return current and grounding concept.

OBSAH:

ÚVOD	8
1 ŽELEZNIČNÍ SYSTÉM A JEHO ČLENĚNÍ	9
1.1 STRUKTURA ZÁKONŮ A PŘEDPISŮ V ŽELEZNIČNÍ DOPRAVĚ	10
1.2 ZÁKLADNÍ ŽELEZNIČNÍ SUBSYSTÉMY	11
2 SUBSYSTÉM ENERGIE	13
2.1 NAPÁJENÍ	13
2.1.1 POUŽÍVANÉ NAPÁJECÍ SOUSTAVY	13
2.1.2 LIMITY NAPĚTÍ A KMITOČTU	19
2.1.3 PARAMETRY Z HLEDISKA VÝKONNOSTI NAPÁJECÍ SOUSTAVY	20
2.1.4 KOORDINACE ELEKTRICKÝCH OCHRAN.....	23
2.2 GEOMETRIE TROLEJOVÉHO VEDENÍ A JAKOST ODBĚRU PROUDU	24
2.2.1 GEOMETRIE TROLEJOVÉHO VEDENÍ	24
2.2.2 JAKOST ODBĚRU PROUDU	25
2.3 SYSTÉM SBĚRU ENERGETICKÝCH ÚDAJŮ.....	26
2.3.1 REKUPERAČNÍ BRZDĚNÍ	27
2.4 OCHRANNÁ OPATŘENÍ PROTI ÚRAZU ELEKTRICKÝM PROUDEM	28
3 SUBSYSTÉM ŘÍZENÍ A ZABEZPEČENÍ	30
3.1 EVROPSKÝ SYSTÉM ŘÍZENÍ ŽELEZNIČNÍHO PROVOZU „ERTMS“	31
3.1.1 INFRASTRUKTURNÍ ČÁST	31
3.1.2 PALUBNÍ ČÁST.....	33
3.1.3 APLIKAČNÍ ÚROVNĚ	34
3.2 DETEKCE VLAKŮ	37
3.2.1 KOLEJOVÉ OBVODY	37
3.2.2 POČÍTAČE NÁPRAV	43
4 SUBSYSTÉM KOLEJOVÁ VOZIDLA	44
5 ELEKTRICKÁ JEDNOTKA PRO REGIONÁLNÍ DOPRAVU	45
5.1 TECHNICKÉ PARAMETRY	46
5.2 PROSTOROVÁ DISPOZICE.....	47
6 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ KOMPONENT PŘÍVODU PROUDU	49
6.1 NÁVRH A DIMENZOVNÍ KOMPONENT STŘÍDAVÉ ČÁSTI ROZVODU	51
6.1.1 SBĚRAČ PROUDU AC	54
6.1.2 HLAVNÍ VYPÍNAČ A ZEMNÍ ODPOJOVAČ AC	56
6.1.3 SVODIČ PŘEPĚTÍ AC	58
6.1.4 MĚŘÍCÍ TRANSFORMÁTOR PROUDU A NAPĚTÍ AC	60
6.1.5 NÁVRH SOUČÁSTEK NA ROZVOD PROUDU AC	62

6.2	NÁVRH A DIMENZOVÁNÍ KOMPONENT STEJNOSMĚRNÉ ČÁSTI ROZVODU	69
6.2.1	Sběrač proudu DC	69
6.2.2	Hlavní vypínač a zemnicí odpojovač DC	71
6.2.3	Svodič přepětí DC	73
6.2.4	Měřicí transformátor proudu a napětí DC	73
6.2.5	Návrh kabelových tras DC	75
6.3	Celkové schéma a prostorové řešení komponent přívodu proudu	78
7	KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ KOMPONENT ZPĚTNÉ CESTY PROUDU.....	83
7.1	Pracovní uzemnění	84
7.2	Ochranné uzemnění	84
	ZÁVĚR.....	88
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	90
	SEZNAM OBRÁZKŮ	95
	SEZNAM TABULEK	97
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	98

ÚVOD

Od doby, kdy Werner von Siemens v roce 1879 představil první elektrickou lokomotivu, prošla železnice (ostatně jako celý obor elektrotechniky) velmi intenzivním vývojem. Tento rychlý rozvoj techniky, spolu s politicko-ekonomickými aspekty, přinesl ve 20. století často nekoordinované zavádění různých a navzájem obtížně kompatibilních technologií v jednotlivých státech. S tím však pochopitelně vyvstaly i některé problémy, které postupně začaly přepravu po železnici znesnadňovat, a tím i bránit ještě progresivnějšímu rozvoji mezinárodní železniční dopravy. Jednalo se zejména o velkou nejednotnost systémů, norem a pravidel používaných po celém světě.

Postupem času proto vznikla snaha železniční systém pokud možno co nejvíce sjednotit a umožnit hladký a nepřerušovaný průjezd drážních vozidel na co nejdélší vzdálenosti. Jeden ze zásadních počínů v tomto směru představovalo vydání tzv. technických specifikací pro interoperabilitu, zkráceně TSI (z anglického „*Technical Specifications for Interoperability*“).

V TSI je zavedeno rozdělení na čtyři základní strukturální oblasti, a to „Energie“, „Infrastruktura“, „Řízení a zabezpečení“ a „Kolejová vozidla“. Uvedeného členění se drží i tato práce a ve své první části definuje požadavky na uvedené oblasti, stanovené jednak právě v technických specifikacích pro interoperabilitu, ale i dalších dokumentech, jako jsou zákony v jednotlivých státech, technické normy či mezinárodní železniční dohody. Důraz je v textu kladen zvláště na vzájemné vazby a interakce mezi jednotlivými subsystemy, a to zejména se zaměřením na jejich vztah ke komponentům vysokého napětí.

A právě návrhu řešení napájení trakčních vozidel je věnována i hlavní část této práce. V souladu se současnými trendy v železniční dopravě, které směřují ve značné míře k náhradě těžkých lokomotiv a jednotlivých vozů lehčími a úspornějšími ucelenými elektrickými soupravami, byla pro vzorový koncepční návrh zvolena dvousystémová regionální (příměstská) jednotka, určená pro provoz v sítích 3 kV DC a 25 kV; 50 Hz AC – tedy na obou u nás nejvíce používaných napájecích systémech.

Obdobné vlaky různých výrobců jsou s úspěchem používány v řadě evropských zemí, a zejména právě v příměstské regionální dopravě představují díky svému obousměrnému uspořádání, plné bezbariérovosti a dostatečnému trakčnímu výkonu (snaha o intenzivní brzdění, rychlou výměnu cestujících a intenzivní rozjezd) velmi žádaný a oblíbený produkt mezi železničními dopravci i cestujícími.

V jednotlivých kapitolách práce tak budou postupně nejprve shrnuty technické parametry a navržena základní prostorová dispozice uvažované elektrické jednotky. Další část pak bude věnována samotnému návrhu a dimenzování vysokonapěťových komponent a specifikům, které jejich použití na drážním vozidle přináší.

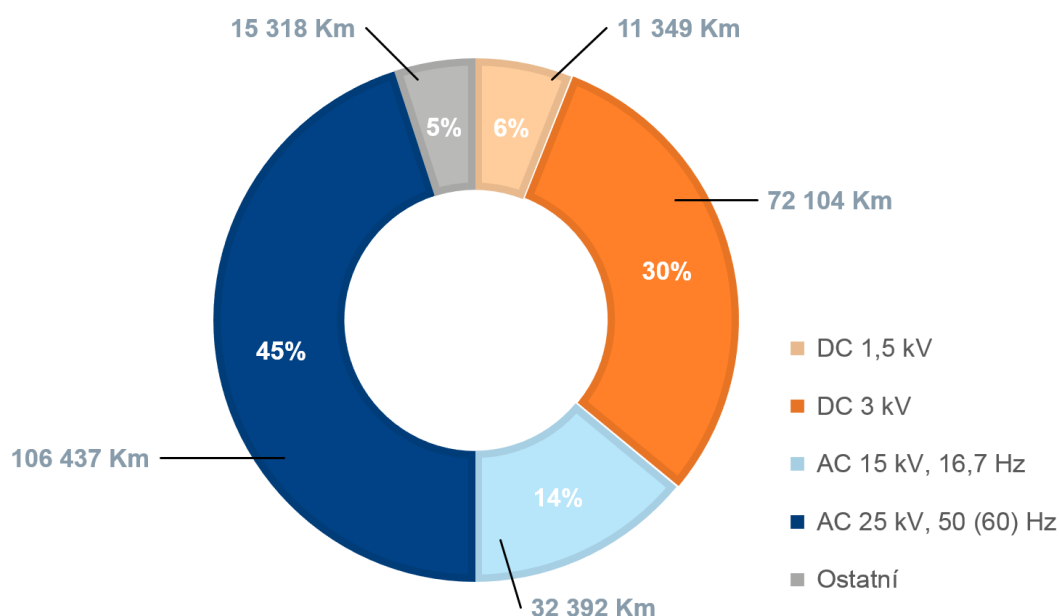
Závěrečná kapitola práce pak stručně zmiňuje i problematiku vedení zpětného proudu a uzemňování. Ta je pro správnou funkčnost systému napájení vozidel zcela nezbytná a obě oblasti jsou tak spolu velmi těsně provázány.

1 ŽELEZNIČNÍ SYSTÉM A JEHO ČLENĚNÍ

Železniční systém je už ze své podstaty spleť a různorodý celek, který od dob svého vzniku na počátku 19. století prošel poměrně bouřlivým vývojem. Pochopitelně tak vznikla postupem času po celém světě celá řada odlišných systémů, norem a pravidel.

Pokud naši pozornost zaměříme na vývoj v Evropě, resp. na našem území, tak již z historického pohledu za dob Rakouska-Uherska vznikala řada soukromých železnic, které se však v rámci vzniku státní sítě dařilo postupně sjednotit. Vytvořila se tak (i když samozřejmě s určitými národními odlišnostmi) poměrně ucelená evropská železniční síť, jejíž jednota byla do značné míry porušena až s rozšířením všeobecné elektrifikace evropských států. Tak se stalo, že v období parní trakce v podstatě propojitelnou evropskou železniční síť rozdělila v průběhu dvacátého století elektrizace železničních tratí na několik vzájemně obtížně slučitelných území, vyznačujících se různými napájecími napětími i kmitočty. Kromě potíží v mezistátní dopravě si některé evropské země, včetně bývalého Československa, zkomplikovaly dvojicí trakčních soustav i svůj vnitrostátní provoz.

Další evropské země zvolily přístup odlišný a důsledně elektrizovaly svoji železniční síť jedinou soustavou, byť se již třeba na základě nových poznatků a možností techniky jevila v průběhu dalších let jako neperspektivní. Jednotlivé přínosy a negativa, a tím i pomyslné pořadí výhodnosti každého ze systémů, se navíc v průběhu minulého století s vývojem poznání postupně měnily. V průběhu času tak vznikla vzájemně roztržštěná síť různých energetických napájecích soustav, jejichž procentuální zastoupení ilustruje následující graf.



Obr. 1.1: Zastoupení jednotlivých železničních napájecích soustav ve světě (stav k roku 2003), údaje převzaté z [1].

Z pohledu trakce se problém odlišného napájení podařilo poměrně uspokojivě vyřešit s příchodem vícesystémových hnacích vozidel. Ale přestože to na první pohled nemusí být zcela patrné, ani samotné napájecí systémy nejsou tak jednotné, jak by se mohlo zdát.

V některých případech se státy používající stejné napájecí napětí navzájem odlišují šířkou smykadla sběrače či jeho materiálem, limitem síťového proudu při odběru i při rekuperačním brzdění, jakožto i výší napětí při rekuperaci. Ke zvláštním požadavkům některých zemí patří i schopnost přejet se vztyčeným sběračem místo bez trakčního vedení.

Navíc rozdílnost elektrizačních soustav nadále představuje překážku při provozu osobních železničních vozů. V návaznosti na použitý napájecí systém v trolejovém vedení jsou využívány odlišné způsoby napájení vagonů průběžným vedením z lokomotivy. To ovšem komplikuje provedení systémů vytápění, klimatizace či osvětlení, protože příslušná zařízení musí být pochopitelně uzpůsobena k jízdě pod různými napájecími systémy, a navíc být schopna se automaticky přizpůsobit této změně.

Samostatnou kapitolou je pak nekoordinovaný přístup jednotlivých států ve vývoji a zavádění do provozu značného množství zpravidla vzájemně nekompatibilních zařízení sdělovací a zabezpečovací techniky.

Nejednotnost elektrizace železnic se tak, spolu se svými důsledky do oblasti zabezpečovací techniky, ukázala být jednou ze základních překážek na cestě k interoperabilitě (tj. vzájemné propojitelnosti). Dříve tento problém nebyl pokládán za příliš palčivý a jeho celoevropské řešení bylo často odsouváno na neurčito. Až čas přinesl i jiná poznání – přibližně dvě třetiny přepravních výkonů nákladní železniční dopravy v České republice míří nebo pochází ze zahraničí. Rovněž přepravní výkony mezistátní osobní železniční dopravy každoročně významně narůstají, navíc je s nimi spojena velice bonitní klientela.

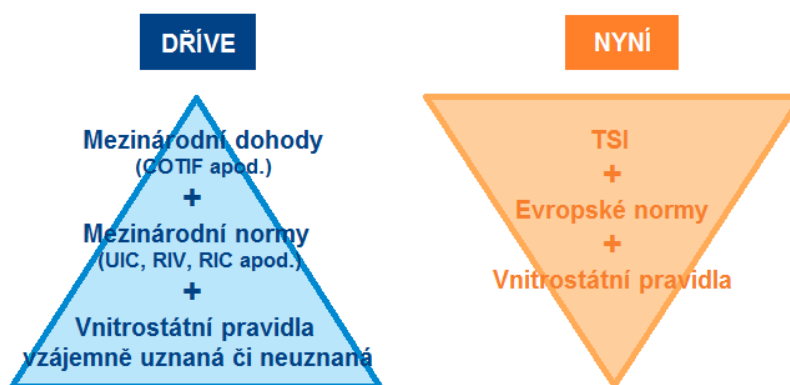
Nejen z těchto důvodů proto vznikla snaha železniční systém co nejvíce sjednotit. Jeden ze zásadních počinů v tomto směru představovalo vydání tzv. technických specifikací pro interoperabilitu, zkráceně TSI.

1.1 Struktura zákonů a předpisů v železniční dopravě

Směrnice TSI stojí na jakémisi pomyslném vrcholu pyramidy a usnadňují přechod ze starých vnitrostátních železničních systémů, které podléhaly převážně vnitřním pravidlům, na sdílený evropský železniční prostor, řízený převážně společnými předpisy EU. Mezi základní cíle TSI patří požadavky na bezpečnost, spolehlivost, ochranu zdraví a životního prostředí a v neposlední řadě na technickou kompatibilitu. Záměrně se však nevěnují oblastem, které se týkají požadavků na pohodlí cestujících ani dalším tématům, která nepředstavují překážku volnému průjezdu vozidel napříč železniční infrastrukturou jednotlivých států nebo neohrožují bezpečnou jízdu vlaků.

Na technické specifikace pro interoperabilitu navazují a obecné požadavky na jednotlivé oblasti železničního systému dále rozšiřují společné normy evropské (EN), které jsou následně jednotlivými členskými státy přejímány jako normy národní, tzv. harmonizované (v případě ČR jde o normy označované jako ČSN EN). Kromě oblastí zahrnutých do TSI se tyto normy věnují současně i požadavkům na další části železničního systému, ve specifikacích pro interoperabilitu neobsaženým.

Posledním stupněm zmiňované pomyslné pyramidy (jak je naznačeno i v pravé části na Obr. 1.2) jsou pak jednotlivá pravidla národní, která mohou do určité míry přizpůsobit nadřazené předpisy evropské specifickým potřebám jednotlivých států.



Obr. 1.2: Dřívější a současná hierarchie jednotlivých předpisů v železniční dopravě.

1.2 Základní železniční subsystémy

Zákon o drahách [7] rozděluje železniční tratě na dráhy vybavené pro rychlosti drážních vozidel nad 200 km/h, označované jako vysokorychlostní (HS), a na dráhy konvenční (CR), pro tratě s rychlostmi nižšími. Konvenční i vysokorychlostní železniční systém je tvořen dílčími subsystémy. Tomu odpovídá i **systematika TSI** a v ní zavedené členění na **čtyři základní strukturální oblasti** [8] [9]:

- **Energie** (Energy – ENE)
- **Infrastruktura** (Infrastructure – INF)
- **Řízení a zabezpečení** (Control-Command and Signalling – CCS)
- **Kolejová vozidla** (Rolling Stock – RST)

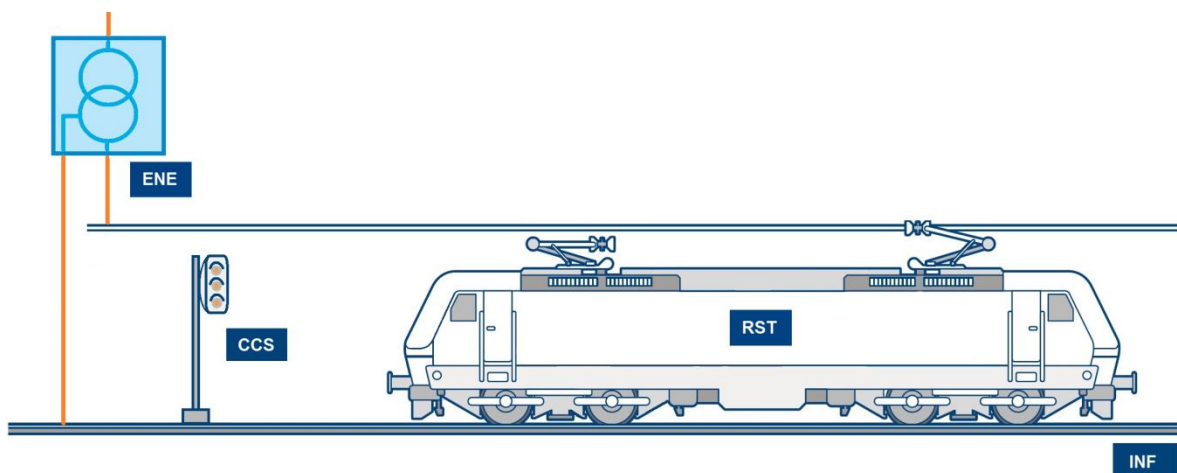
První dva subsystémy lze nazvat síťovými, poslední pak subsystémem vozidlovým. Třetí oblast, tj. řízení a zabezpečení, má jak část palubní, tak traťovou, a lze ji proto zařadit na pomyslné rozhraní mezi obě kategorie. Kromě dělení na strukturální oblasti, existuje ještě dělení subsystémů na **funkční oblasti** provoz a řízení dopravy (OPE), údržbu (MAI) a využití telematiky v osobní a nákladní dopravě (TAP/TAF). V dalším textu ale pro přehlednost zůstaneme u prvně zmíněného členění na oblasti strukturální.

Pod **subsystém energie** spadají obecně veškerá stacionární zařízení potřebná pro zajištění dodávky trakční energie pro vlaky. Do této skupiny patří tedy zejména trakční napájecí a spínací stanice, systém trakčního vedení a obvod zpětné proudové cesty. Dále pak také systém měření spotřeby elektrické energie trakčními vozidly a ochranná opatření proti úrazu elektrickým proudem.

Subsystém infrastruktury zahrnuje definice parametrů tratí, kolejí či výhybek, stejně jako s nimi přímo souvisejících stavebních objektů (mostů, tunelů, nástupišť, zařízení na vnější údržbu a mytí vlaků atd.).

Oblast řízení a zabezpečení zastřešuje všechna zařízení nezbytná k zajištění bezpečnosti, řízení a kontroly pohybu vlaků na železniční infrastruktuře. Do tohoto subsystému patří zejména vlakové zabezpečovací zařízení, rádiová hlasová a datová komunikace a systém detekce vlaků.

Čtvrtý **subsystém**, nazvaný **kolejová vozidla**, pak shrnuje požadavky na strukturu, systém řízení a zabezpečení všech elektrických a mechanických částí trakčních i netrakčních vozidel.



Obr. 1.3: Rozdělení železničního systému na jednotlivé strukturální subsystémy podle směrnice TSI.

Pravděpodobně už z předchozího textu je patrné, že existují poměrně silné vazby a průniky mezi jednotlivými subsystémy, umocněné navíc skutečností, že kromě infrastrukturní oblasti jsou všechny ostatní více či méně provázány s elektrickým napájením a zásobováním vozidel elektrickou energií. Jednotlivé subsystémy však byly v minulosti vnímány, rozvíjeny a řízeny v zásadě jako samostatná uzavřená odvětví a vzájemná komunikace, resp. rozhraní mezi nimi byly definovány do velmi omezené formy a potlačeny na minimum.

Tato skutečnost je například dobře patrná ze vzájemného vztahu subsystémů RST a CCS. Vnitřně jde o velmi sofistikované subsystémy, ale jejich vzájemná komunikace je v tradičním pojetí řízení železničního provozu velmi chudá – interakce mezi tratí a vlakem má zpravidla velmi omezený rozsah, kdy informace o poloze vlaku na trati je známa jen s poměrně nízkou přesností. Nehledě na fakt, že není k dispozici ani údaj o rychlosti nebo aktuálním zrychlení vlaku. Naopak dopravní cesta provoz na železnici řídí pouze vytvářením návěštních znaků na návěstidlech. To nevytváří podmínky pro efektivní provoz železnice, a navíc to ani neodpovídá možnostem, kterými současné technologie disponují.

Avšak nejde jen o komunikaci mezi subsystémy „Řízení a zabezpečení“ a „Vozidla“. Podobně nedostatečná je i výměna informací mezi vozidly a subsystémem ENE. Pouhá sada návěštních znaků upozorňující na nutnost stažení a zdvihnutí sběrače nebo tradičně používané akční zásahy, jako okamžité vypnutí přetíženého úseku rychlovypínačem v napájecí stanici či penále za překročení sjednaného čtvrt hodinového odběrového maxima, jsou velice hrubými kroky k optimální koordinaci aktivit dopravy a energetiky a nemohou nahradit to, co je podstatu tzv. chytrých sítí (*smart grids*) – tedy vzájemnou komunikaci zdrojů a spotřebičů v celém energetickém systému, a tím i optimalizaci spotřeby.

Naštěstí dochází k postupnému přehodnocování tohoto přístupu a zavádění nových trendů i v oblasti železniční dopravy. Cílem práce je proto čtenáři v dalších částech poskytnout aktuální pohled na současný vývoj jednotlivých strukturálních oblastí, včetně jejich vzájemných vazeb a významu pro fungování celého železničního systému.

2 SUBSYSTÉM ENERGIE

Jak již bylo uvedeno, pod subsystem energie spadají obecně veškerá stacionární zařízení potřebná pro zajištění dodávky trakční energie pro vlaky. Podle směrnice TSI Energie jsou základní parametry charakterizující tento subsystem následující: [10]

- **Napájení**
- **Geometrie trolejového vedení a jakost odběru proudu**
- **System sběru energetických údajů**
- **Ochranná opatření proti úrazu elektrickým proudem**

2.1 Napájení

Cílem systému napájení je zásobovat všechny vlaky elektrickou energií. Napájecí soustava je tvořena trakčními měnírnami (u stejnosměrných soustav) či trakčními transformovny (u střídavých soustav), připojenými k rozvodu distribuční soustavy. Zde dochází k transformaci napětí na požadovanou úroveň, případně k jeho usměrnění. K napájecím stanicím jsou následně připojeny jednotlivé úseky trakčního vedení, navzájem elektricky izolované tzv. oddělovacími úseky. Propojení jednotlivých úseků je možné za použití tzv. spínacích stanic, umístěných na mezilehlých místech mezi stanicemi napájecími. Elektrický obvod se následně uzavírá přes trakční vozidla a zpětnou proudovou cestu (obvykle pojížděná kolejnice) zpět do napájecí stanice.

Ačkoli tedy napájení elektrických drah a pevná trakční zařízení nejsou hlavním obsahem této práce, je celá problematika železničního systému do značné míry provázána a pro návrh systémového řešení trakčního napájení vozidel je znalost těchto vazeb nezbytná. Aniž bychom se proto v dalším textu problematikou dopodrobna zabývali, jsou uvedeny alespoň základní charakteristiky jednotlivých napájecích soustav, a to zejména ve vztahu k zařízením vysokého napětí na železničních vozidlech.

2.1.1 Používané napájecí soustavy

Dle platné směrnice TSI Energie [10] musí být pro nové, modernizované nebo obnovené železniční napájecí systémy použita jedna z následujících čtyř napájecích soustav:

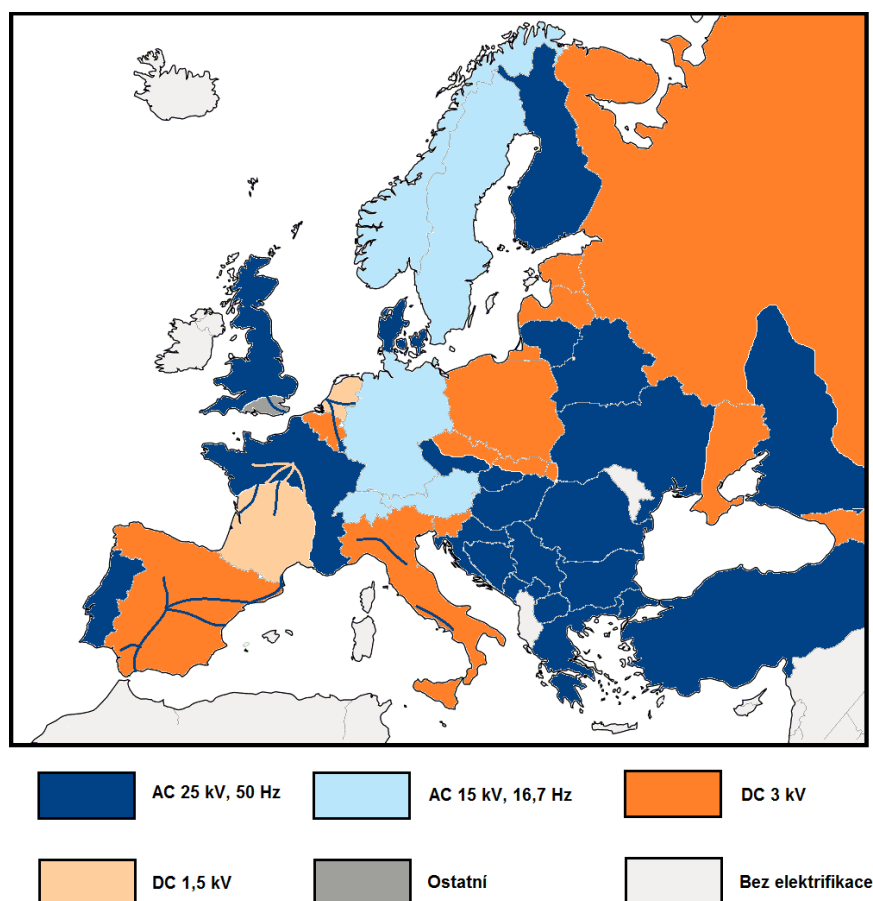
- **Stejnoseměrná soustava 1,5 kV**
- **Stejnoseměrná soustava 3 kV**
- **Střídavá soustava 15 kV; 16,7 Hz**
- **Střídavá soustava 25 kV; 50 Hz**

Stejnoseměrná soustava 1,5 kV

Tato napájecí soustava je dnes používána spíše již jen jako pozůstatek historického vývoje elektrifikace železnic a k jejímu dalšímu rozvoji nadále nedochází. Na našem území byla tímto systémem v počátcích elektrizace železnic ve 20. letech minulého století elektrifikována

část pražského železničního uzlu (po 2. sv. válce přepnuto na napětí 3 kV). Systém 1,5 kV byl pak ještě použit ve 30. a 50. letech při rekonstrukcích prvních českých elektrických železnic Tábor – Bechyně a Rybník – Lipno nad Vltavou (po modernizaci v roce 2003 je na poslední zmíněné trati využíván již střídavý systém 25 kV, 50 Hz).

V rámci Evropy systém 1,5 kV dosud slouží k napájení drah v jižní Francii a v Nizozemsku. Vzhledem k tomu, že je většina vlastností shodná se stejnosměrnou soustavou 3 kV, je další popis zařazen právě k tomuto systému.



Obr. 2.1.: Napájecí soustavy v Evropě, data převzatá z [1].

Stejnoseměrná soustava 3 kV

Stejnoseměrná soustava 3 kV je u nás nejpoužívanějším napájecím systémem – je zavedena na 57 % elektrifikovaných tratí (zejména na severu a severovýchodě ČR). [3] V Evropě je pak používána například v Polsku, Itálii nebo ve Španělsku (mimo vysokorychlostních tratí).

Jak již bylo uvedeno, charakteristiky této soustavy jsou do značné míry podobné se systémem 1,5 kV, liší se prakticky pouze dimenzováním izolační hladiny použitých prvků na vyšší napětí a zvýšenými nároky na spínací přístroje (při zhášení oblouku). Na druhou stranu díky vyššímu napětí a menším trakčním proudům soustava 3 kV umožňuje vyšší výkonové zatížení trati než systém 1,5 kV.

Obecně platí, že výkon, který může daná soustava přenášet, je přímo úměrný hodnotě napětí a nepřímo úměrný podélné impedanci vedení pro danou délku napájeného úseku. Z této

zákonitosti rovněž plyne zásadní nevýhoda stejnosměrných soustav ve srovnání se systémy střídavými – tj. problematické přenášení vyšších výkonů. Ačkoli tedy mají stejnosměrné systémy menší impedanci trolejového vedení, jsou zároveň provozovány na výrazně nižších napěťových hladinách, a tudíž při stejném příkonu vozidla zatíženy vysokými trakčními proudy a s tím souvisejícími vysokými úbytky napětí a ztrátami na vedení. Dalším z toho vyplývajícím negativem je i nutnost výstavby většího počtu napájecích stanic (obvyklá vzdálenost mezi stanicemi se pohybuje v rozmezí od 5 do 20 km) a použití trolejového vodiče o větším průřezu, který je případně ještě doplněný zesilovacím vedením.

Nepříznivá situace je částečně kompenzována tzv. oboustranným napájením, kdy jsou jednotlivé traťové úseky napájeny ze dvou protilehlých trakčních měníren současně. Výsledkem je vyšší spolehlivost napájení a příznivější rozložení zátěže dle polohy vozidla mezi jednotlivé měnírny. Dále je rovněž možné vhodným zapojením trakčních transformátorů a měničů značně omezit vliv vyšších harmonických směrem do nadřazené energetické sítě – distribuční soustavy na napěťové hladině 110 kV, případně i 22 nebo 35 kV.

Problémem stejnosměrných soustav je také vznik bludných proudů podél elektrizovaných tratí v okolí napájecích stanic. Bludné proudy způsobují korozi kovových objektů uložených v zemi, a je proto nutné pamatovat na zajištění jejich dostatečné ochrany. V porovnání se střídavými soustavami se ale poměrně jednoduše naopak odstraňují rušivé vlivy trakčního proudu na sdělovací a zabezpečovací zařízení.

Střídavá soustava 15 kV; 16,7 Hz

S výjimkou krátkého úseku trati Znojmo – Šatov – st. hranice s Rakouskem se na našem území tento napájecí systém nepoužívá. Jde o soustavu rozšířenou hlavně v německy mluvících zemích a v části Skandinávie (Norsko, Švédsko).

V síti je používán o třetinu nižší kmitočet než v energetické rozvodné soustavě, což se pozitivně projevilo ve snížení impedance trakčního vedení. V kombinaci s použitím dostatečně vysokého napětí tak došlo, při porovnání se stejnosměrnými soustavami, ke zvýšení přenosové schopnosti vedení při současné úspoře investičních nákladů. Pro napájení postačí menší vodivé průřezy trolejového vedení a současně mohou být větší vzdálenosti mezi napájecími stanicemi – délka jednotlivých napájecích úseků se pohybuje v poměrně širokém rozpětí od 30 do 80 km podle velikosti zatížení tratě a sklonových poměrů. [3]

Trakční soustava 16,7 Hz používá pro napájení vlastní jednofázové elektrárny, případně centrálně rozmístěné rotační/polovodičové měniče, připojené na veřejnou energetickou síť. Následně je výkon rozváděn samostatnými jednofázovými linkami 110 kV; 16,7 Hz, oddělenými od běžné třífázové rozvodné sítě, které napájí jednotlivé trakční transformovny (takto je rozvod proveden například v Německu). Druhou možností je uskutečňovat změnu napětí, fáze i frekvence až v koncových napájecích stanicích. Napájení tímto způsobem je obvykle provedeno v těch případech, kdy by nebylo hospodárné paralelně s energetickými sítěmi vést další linky vvn sníženého kmitočtu (země s malou hustotou osídlení – tj. Švédsko, Norsko).

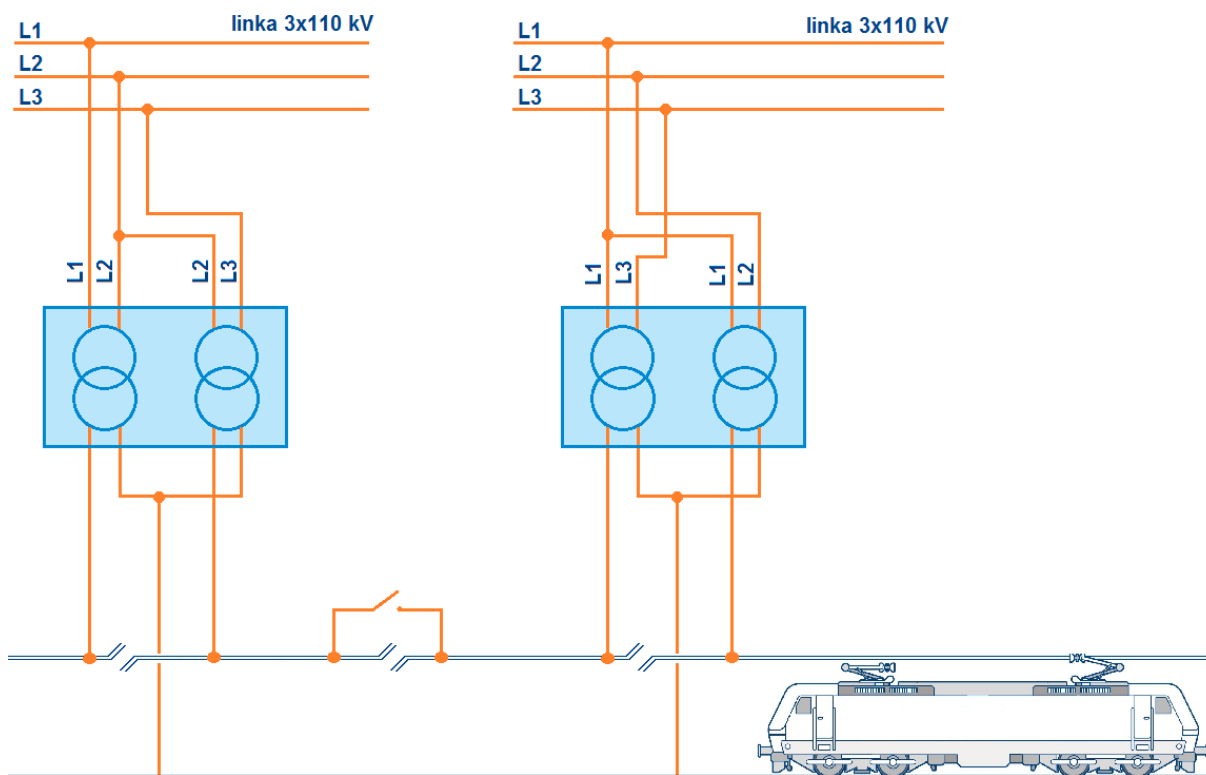
V obou uvedených případech mohou sousední napájecí stanice pracovat paralelně do trakční sítě (tj. již zmíněné oboustranné napájení). Celá soustava je tedy propojená, odpadají proto problémy s oddělovacími úseky při střídání fází a je zde téměř stoprocentní jistota

úspěšné rekuperace (o rekuperaci viz dále). Nevýhodou oproti stejnosměrným soustavám je možné vzájemné rušení se zařízeními sdělovací a zabezpečovací techniky, proto je nutné se ochranou proti těmto vlivům u sítě 15 kV; 16,7 Hz podrobněji zabývat.

Střídavá soustava 25 kV; 50 Hz

Střídavá trakce 25 kV; 50 Hz je druhou nejpoužívanější napájecí soustavou v ČR (podíl 42 % z celkové délky elektrifikovaných tratí – zejména jih a jihozápad ČR). [3] Je rozšířená převážně v zemích, kde elektrizace železnic začala později, tedy například v Maďarsku, Bulharsku nebo Dánsku. Část států, obdobně jako Česká republika, pak zavedla tento systém souběžně s již používanou stejnosměrnou soustavou – případ Francie, Anglie či Ruska.

Podobně jako u střídavé soustavy sníženého kmitočtu je z hlediska přenosových schopností výhodou systému 25 kV; 50 Hz poměrně vysoké použité napájecí napětí. Stejná frekvence jako ve všeobecné energetické síti pak umožňuje přímé připojení napájecích stanic na distribuční soustavu (v ČR na napěťové úrovni 110 kV) bez nutnosti použití frekvenčních měničů. Přímé připojení na energetickou síť však přináší jeden závažný problém – zatěžování trojfázového rozvodu nesymetrickým jednofázovým odběrem, navíc velmi proměnlivým v čase. Tento stav je z pohledu energetických společností silně nežádoucí, proto se pro alespoň částečné vyrovnaní nesymetrie nejčastěji používá zapojení transformátorů do „V“, kdy jsou traťové úseky přilehlé k trakční transformovně napájeny různými fázemi. Principiální schéma je naznačeno na následujícím obrázku.



Obr. 2.2: Principiální schéma napájení jednofázové trakce 25 kV; 50 Hz zapojením transformátorů do otevřeného trojúhelníku, tzv. do „V“, podklad převzatý z [2].

Prostřídáním fází však dochází k fázovému posunu jednotlivých napájecích úseků o 120 stupňů. Síť je tak provozována výhradně jako paprsková, v opačném případě by vznikl mezi jednotlivými sekcemi mezifázový zkrat. Oboustranné napájení není bez dalších úprav systému dále možné ani z důvodu nežádoucích přetoků vyrovnávacích proudů mezi napájecími stanicemi, kdy by po trakčním vedení tekla vyrovnávací proud z jedné distribuční linky 110 kV do druhé. Spínací stanice umístěné na mezilehlých místech mezi stanicemi napájecími tak pouze zajišťují prodloužení napájecího úseku v případě poruchy nebo výluky jedné ze sousedních trakčních transformoven a rozdělení výpadku jejího výkonu mezi oba sousední napáječe. [3]

Vzdálenost mezi jednotlivými napájecími stanicemi se vlivem vyšší impedance trakčního vedení oproti soustavě 15 kV; 16,7 Hz a nemožnosti využít oboustranné napájení pohybuje na mírně nižších hodnotách než v předchozím případě – obvykle do 50 km. V současné době již existují i technická řešení, založená na aplikaci polovodičových měničů v napájecích stanicích, umožňující oboustranné napájení i v síti 25 kV; 50 Hz a prodlužující délku napájecích úseků až na dvojnásobek. Zatím se však zejména z ekonomických důvodů od jejich instalace ustoupilo. Do budoucna je však (společně s postupným přechodem na jednotnou proudovou soustavu – viz dále) právě s tímto vznikem systému 25 kV; 50 Hz jednotné fáze počítáno. [38]

Dříve se rovněž objevoval, zejména u vozidel starší konstrukce s diodovými usměrňovači, problém nedodržování požadované hodnoty účinníku. Tím docházelo k zatěžování rozvodu odběrem jalového výkonu a také dalším ztrátám v přenosu. Navíc měl odebíraný proud nesinusový průběh, čímž vznikaly vyšší harmonické složky zatěžující síť tzv. deformačním výkonem. Oba tyto nedostatky se podařilo vyřešit s příchodem čtyřkvadrantových vstupních měničů na vozidlech, které zabezpečují velmi kvalitní odběr proudu jak z pohledu fázového posuvu, tak i z pohledu vyšších harmonických složek. Pro kompenzaci jalového výkonu mohou být případně používány i statická kompenzační zařízení v transformačních stanicích.

Myšlenka jednotné trakční soustavy

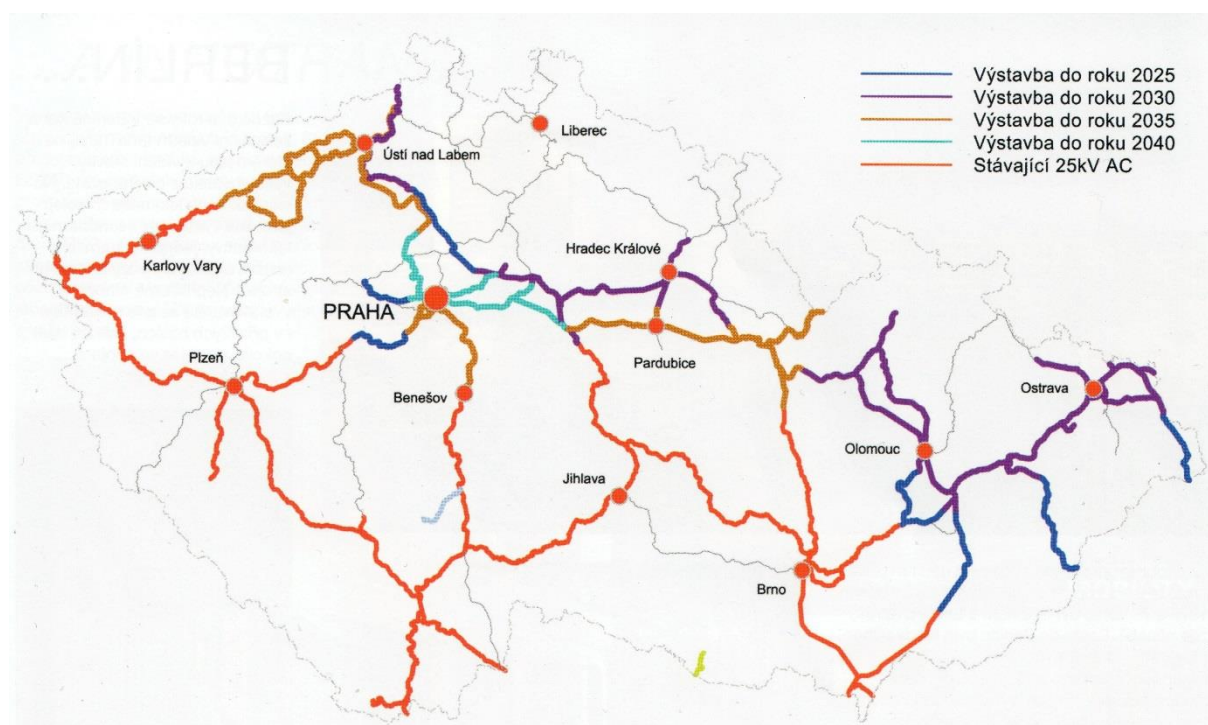
Každá ze zmíněných soustav má své přednosti i nedostatky. Již řadu let je však jednoznačně, z důvodů v předchozím textu popsaných, upřednostňováno použití soustav střídavých. V minulosti se proto po celé Evropě objevovaly snahy o přebudování stávající infrastruktury na jednotnou proudovou soustavu 25 kV; 50 Hz a toto téma je aktuální také v současné době, i když primárně z jiných důvodů než dříve.

Zatímco konstrukce hnacích vozidel od dob nejstarších lokomotiv se stejnosměrnými sériově buzenými trakčními motory a odporovou regulací výrazně pokročila, dostávají se do popředí problémy na straně infrastruktury, zejména co se přenosových schopností stejnosměrných soustav týče. Ty nejsou nadále schopny zajistit dostatečný přenos trakční energie pro jízdy vlaků vysokými rychlostmi. Z toho důvodu je proto k napájení nových vysokorychlostních železnic dokonce evropskými směnicemi použití soustav střídavých vyžadováno.

I z těchto důvodů byla v roce 2014 zpracována studie [38] zabývající se touto problematikou a byl nastíněn plán postupného přechodu české železniční sítě na jednotný systém 25 kV; 50 Hz. Pro úspěšnou konverzi ze stejnosměrné trakční soustavy na síť

střídavou bude důležité zajistit připravenost nově elektrizovaných nebo rekonstruovaných úseků na budoucí přepnutí. Ideální doba konverze na jednotný systém je uvažována s ohledem na životnost jak hnacích vozidel, tak pevných trakčních zařízení na přibližně 30 let. Z dosavadních analýz dále vyplývá, že pro střídavou trakci je použitelné stávající dostatečně dimenzované trolejové vedení stejnosměrného systému, je však třeba instalovat izolátory na vyšší jmenovité napětí soustavy. Současně musí být z důvodu zabránění rušení zajištěno použití stíněných kabelů pro zařízení zabezpečovací techniky. Zcela přestavět bude pochopitelně nutné napájecí stanice.

Na prvně zmíněný dokument navázala i studie [4] zpracovaná v loňském roce (2016) pro Ministerstvo dopravy ČR, která rovněž potvrdila nutnost přechodu na celistvý systém 25 kV; 50 Hz. Jedním z hlavních výstupů studie bylo i stanovení harmonogramu přechodu (viz Obr. 2.3) a jeho technicko-ekonomické zhodnocení.



Obr. 2.3: Navržený časový harmonogram přechodu na jednotnou napájecí soustavu 25 kV; 50 Hz. [4]

V dokumentu [4] se dále uvádí, že nutné počáteční investiční náklady by měly být vynahrazeny nezanedbatelnými provozními úsporami (dané nižšími ztrátami při přenosu energie z napájecí stanice k vozidlu i vyšší úspěšností rekuperačního brzdění – možná úspora energie činí až okolo 30 %). Další úspora pak přináší i levnější elektrifikace nových tratí, kdy vyšší přenosová schopnost vedení umožňuje stavět napájecí stanice – a to zejména při použití systému jednotné fáze a dvoustranném napájení – ve značně velkých vzdálenostech, např. až 100 km od sebe. V neposlední řadě pak dojde k odstranění problémů a škod způsobovaných bludnými proudy a zániku stykových míst soustav 3 kV a 25 kV.

V některých zemích již dokonce se změnou napájecí soustavy započali – na Slovensku společně s rekonstrukcí tratě Bratislava – Košice dochází k postupnému přesunu místa styku trakčních soustav směrem k Žilině a dále na východ. V Chorvatsku byla v roce 2013

dokončena změna trakce na tratích v oblasti Rijeky a i další země, jako například Francie, Nizozemí nebo Španělsko se myšlenou jednotné trakční soustavy, spolu s rozvojem vysokorychlostních tratí a vozidel, intenzivně zabývají. [38]

2.1.2 Limity napětí a kmitočtu

Základními parametry každé soustavy jsou hodnoty a limity napětí a u střídavých soustav pak pochopitelně i kmitočtu. Dovolené parametry výše zmíněných veličin pro konkrétní soustavu musí být v souladu s normou ČSN EN 50 163, resp. TSI energie a jsou rovněž uvedeny v Tabulce 2.1.

Tab. 2.1: Charakteristiky hlavních používaných napájecích soustav, údaje převzaty z [11].

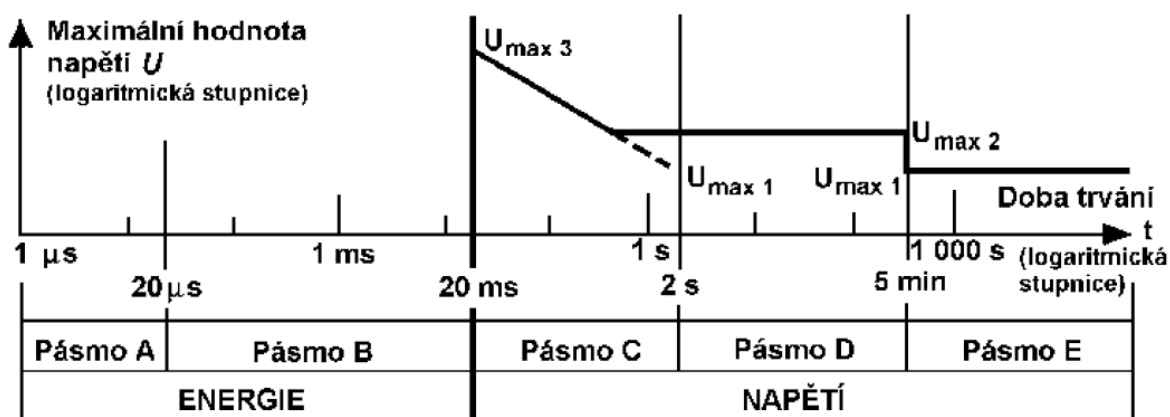
Trakční proudová soustava	Jmenovité napětí	Nejnižší krátkodobé napětí	Nejnižší trvalé napětí	Nejvyšší trvalé napětí	Nejvyšší krátkodobé napětí
	U_n [V]	U_{min2} [V]	U_{min1} [V]	U_{max1} [V]	U_{max2} [V]
Doba trvání		← max. 2 min →		→ max. 5 min ←	
Stojnosměrná (střední hodnoty)	1 500	1 000 ($U_n - 33\%$)	1 000 ($U_n - 33\%$)	1 800 ($U_n + 20\%$)	1 950 ($U_n + 30\%$)
	3 000	2 000 ($U_n - 33\%$)	2 000 ($U_n - 33\%$)	3 600 ($U_n + 20\%$)	3 900 ($U_n + 30\%$)
Střídavá (efektivní hodnoty)	15 000	11 000 ($U_n - 27\%$)	12 000 ($U_n - 20\%$)	17 250 ($U_n + 15\%$)	18 000 ($U_n + 20\%$)
	25 000	17 500 ($U_n - 30\%$)	19 000 ($U_n - 24\%$)	27 500 ($U_n + 10\%$)	29 000 ($U_n + 16\%$)
Trakční proudová soustava	Jmenovitý kmitočet	Nejnižší kmitočet		Nejvyšší kmitočet	
	f_n [Hz]	f_{min} [Hz]		f_{max} [Hz]	
Střídavá (po 99,5% roku)	16,7	16,50 ($f_n - 1\%$)		16,83 ($f_n + 1\%$)	
	50,0	49,50 ($f_n - 1\%$)		50,50 ($f_n + 1\%$)	
Střídavá (po 100% doby)	16,7	15,67 ($f_n - 6\%$)		17,33 ($f_n + 4\%$)	
	50,0	47,00 ($f_n - 6\%$)		52,00 ($f_n + 4\%$)	

Za normálních provozních stavů se musí napětí v trakční soustavě pohybovat v rozmezí $U_{min1} \leq U_n \leq U_{max2}$. Doba, po níž může být v síti napětí v intervalu $\langle U_{max1}; U_{max2} \rangle$, tj. v pásmu D na Obr. 2.4, je navíc omezena na 5 minut. Tohoto napětí smí být dosaženo pouze při krátkodobých stavech, jako je rekuperační brzdění či přepínání odboček systémů pro regulaci napětí.

Dále existuje i definice tzv. nejvyššího dlouhodobého přepětí U_{max3} , která stanovuje maximální hodnotu dlouhodobého přepětí o době trvání 20 ms – pro představu u soustavy 25 kV; 50 Hz je tato hodnota rovna 38,75 kV. Dlouhodobá přepětí – podle jiného přístupu k názvosloví označována též jako přepětí dočasná [12] (na Obr. 2.4 odpovídají pásmu C) – vznikají v síti především v důsledku jevů v obvodech s nízkou impedancí (změny napětí

v primární síti). U střednědobých (spínacích) a krátkodobých (atmosférických) přepětí (pásmo A a B na Obr. 2.4) není napětí bráno v úvahu, protože v podstatě závisí na charakteristikách zdroje a zatížení sítě.

Na druhé straně může být naopak za mimořádných stavů rovněž dosaženo nižšího napětí, než je hodnota U_{min1} , a to až do úrovně nejnižšího provozního napětí U_{min2} (po dobu maximálně dvou minut). Napětí v tomto rozmezí nesmí způsobit žádné škody ani poruchy. Podpěťová relé v napájecích stanicích nebo na palubě drážních vozidel jsou obvykle nastavena na hodnoty od 85 % do 95 % U_{min2} . Pro zabránění vzniku nebo výskytu podpětí v síti mohou být trakční vozidla vybavena tzv. omezovači výkonu (viz kapitola 2.1.3).



Obr. 2.4: Maximální hodnota napětí U podle doby trvání. [12]

Z hlediska kmitočtu je u soustavy 25 kV; 50 Hz frekvence dána všeobecnou rozvodnou sítí a platí pro ni totožné mezní hodnoty jako v energetické přenosové a distribuční soustavě. Totéž se týká i soustavy 15 kV; 16,7 Hz se synchronním připojením k síti (přes synchronní měniče).

U soustav bez synchronního připojení k distribučnímu rozvodu či soustav propojených s oddělenou drážní sítí 16,7 Hz platí limity mírně odlišné a jsou opět uvedeny v normě ČSN EN 50 163. Kmitočet je ve všech případech určován jako střední hodnota frekvence základní harmonické, měřená v intervalu 10 sekund.

2.1.3 Parametry z hlediska výkonnosti napájecí soustavy

Výkonnost napájecí soustavy musí být taková, aby umožňovala splnění požadovaných kritérií s ohledem na nejhustší předpokládaný provoz a použitá hnací vozidla. Za účelem správného návrhu pevných trakčních zařízení musí být proto provedena tzv. studie dimenzování. [10]

V této studii je třeba zohlednit zejména následující parametry:

- **Střední užitečné napětí**
- **Účinnost vlaků**
- **Odebíraný proud**

Návrh dimenzování má zpravidla podobu počítačové analýzy, resp. simulace, při které dochází k ověření splnění základních vlastností napájecí soustavy na definovaném geografickém území v daném časovém intervalu.

Střední užitečné napětí

Střední užitečné napětí je během studie dimenzování vypočteno pro jednotlivé časové intervaly tak, aby co nejdříve zohlednilo parametry infrastruktury a jednotlivé typy vlaků projíždějící v době špičkového provozu zvolenou oblastí – obvykle vybraným napájecím úsekem. Časové kroky v simulaci musí být přitom natolik krátké, aby bylo možné zachytit všechny provozní stavy, a tedy vzít v úvahu nejvyšší zatížení každého napájecího úseku.

Pro účely simulace rozlišujeme střední užitečné napětí oblasti a vlaku. Rozdíl mezi těmito hodnotami spočívá v tom, že střední užitečné napětí oblasti představuje střední hodnotu všech napětí analyzovaných v simulaci a zohledňuje veškeré provozní stavy (trakce, rekuperace, jízda výběhem apod.) všech vlaků v dané oblasti – indikuje kvalitu napájení pro celou oblast.

Na druhé straně střední užitečné napětí vlaku analyzuje napětí pro každý jednotlivý vlak pouze v časových úsecích, kdy souprava odebírá trakční příkon – střední hodnota tohoto napětí poskytuje podklad pro kontrolu výkonnosti konkrétního vlaku a umožňuje stanovit tzv. výpočtový vlak (tj. vlak, jehož trakční schopnosti jsou nízkým napětím nejvíce ovlivněny).

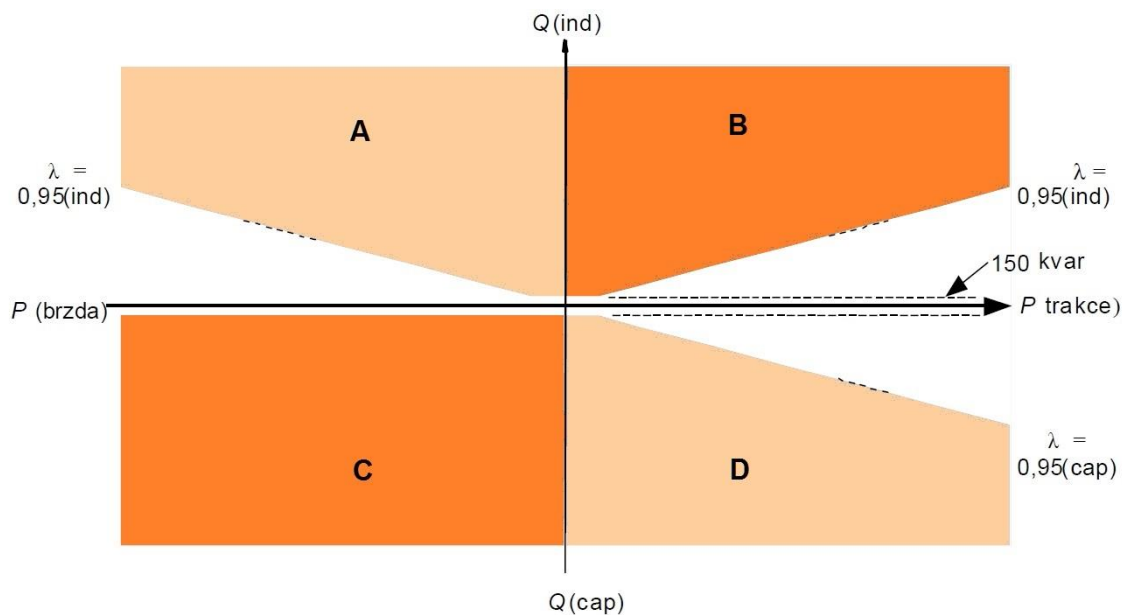
Účinník vlaků

Analýza výkonnosti napájecí soustavy musí vzít v úvahu i hodnoty skutečného účinníku vlaků. Účinník uvažujeme jako celkový průměr během všech provozních stavů po definovanou trasu dle jízdního řádu. Samozřejmě platí, že čím lepší účinník vozidla mají, tím jsou nároky na pevná trakční zařízení menší. Pro účely analýzy rozlišujeme účinník induktivní λ_{ind} a kapacitní λ_{kap} .

U vlaků s výkonem větším než 2 MW platí, že musí mít induktivní účinník lepší než 0,95. U trakčních vozidel o menším výkonu je požadavek snížen na 0,85. Během rekuperace v režimu brzdy je možné nechat induktivní účinník volně poklesnout. Jestliže se však napětí v síti dostane pod nominální hodnotu, je žádoucí (se zřetelem na udržení napětí v daných mezích), aby λ_{ind} nebyl nižší než 0,95.

Co se týká kapacitního účinníku, nejsou pro něj v trakčním režimu definovány konkrétní omezení. Ve slabých sítích je však, s ohledem na zajištění schopnosti rekuperačního brzdění u dalších vozidel, výskyt takového účinníku nežádoucí. Navíc je stanoveno, že po překročení nejvyššího trvalého napětí U_{max1} se vozidlo jako kondenzátor (s ohledem na možná přepětí) chovat nesmí. Během rekuperace musí být případný dodávaný kapacitní výkon omezen na 150 kVAr. [13]

Přehledně jsou jednotlivé požadavky znázorněny na Obr. 2.5 na následující stránce.



Legenda	
A	Nežádoucí plocha pro síťová napětí nižší než normální napájecí napětí
B	Zakázaná plocha pro síťová napětí nižší než U_{max1}
C	Zakázaná plocha
D	Nežádoucí plocha pro síťová napětí vyšší než normální napájecí napětí
P (trakce, brzda)	Trakční (resp. brzdový) činný výkon
Q (ind,cap)	Induktivní (resp. kapacitní) jalový výkon

Obr. 2.5: Přípustný účinek v závislosti na vlakem odebíraném činném a jalovém výkonu, údaje převzaté z [13].

Odebíraný proud

Subsystem energie musí být navržen tak, aby zaručil dosažení stanovené výkonnosti napájecího systému a umožnil provoz vlaků o výkonu menším než 2 MW bez omezení příkonu nebo proudu. Zároveň však každý vlak musí být vybaven voličem proudu nebo výkonu, který by omezoval úroveň maximální spotřeby energie v závislosti na napětí trakčního vedení v ustáleném stavu.

Maximální povolený odebíraný proud vlaku (včetně všech pomocných zařízení) se liší v rámci jednotlivých unijních zemí a často i dle konkrétních tratí. V podmínkách ČR platí pro konvenční tratě (CR) limit 800 A (pro síť 25 kV, 50 Hz), resp. 3000 A (v případě stejnosměrné soustavy 3 kV). Vyšší nebo nižší hodnoty proudu vlaku musí být uvedeny v registru infrastruktury (RINF) samostatně pro každou trať. [13]

Ve stejnosměrných sítích musí být navíc zajištěno omezení odběru proudu u stojících vlaků a to tak, aby u každého pantografového sběrače docházelo k maximálnímu odběru 300 A (u soustavy 1,5 kV), resp. 200 A (u soustavy 3 kV). U střídavých soustav není dle TSI Energie omezení stanoveno, v ČSN EN 50 367 je pak uvedena pro tyto trakční systémy hodnota 80 A. [14]

Účelem tohoto požadavku na maximální odběr je zamezit bodovému přehřívání smykadla pantografového sběrače, resp. trolejového vodiče, když vlak stojí a odebírá energii například pro pomocná zařízení.

2.1.4 Koordinace elektrických ochran

Návrh koordinace elektrických ochran subsystému energie musí splňovat základní předpoklad, kterým je kompatibilita ochranných systémů na hnacích jednotkách a v trakčních napájecích stanicích.

V případě, že dojde ke zkratu mezi trakčním vedením a zemním potenciálem, musí být porucha odstraněna automatickým vypínačem trakční napájecí stanice. Maximální poruchový proud, který se může na vedení vyskytnout, je uveden v Tabulce 2.2. Přitom platí, že v případě proudů maximálních nebo jim blízkých se předpokládá okamžité vypnutí ochran (běžně v časech 50-100 ms, relé záložní ochrany pak asi o 300 ms později).

Tab. 2.2: Maximální poruchový proud při zkratu mezi trakčním vedením a kolejnicí, údaje převzaty z [13].

Trakční proudová soustava	Trakční stanice zapojená paralelně	Maximální poruchový proud
AC 15 kV; 16,7 Hz	Ano	40 kA
AC 25 kV; 50 Hz	Ne	15 kA
DC 3 kV	Ano	50 kA
DC 1,5 kV	Ano	100 kA

V případě vnitřních zkratů hnací jednotky je kromě vypínače v napájecí stanici automaticky okamžitě vypínán i hlavní rychlovypínač na vozidle. U střídavých soustav by měla být činnost obou vypínačů – pokud je to možné – nastavena tak, aby nejprve zapůsobila automatická ochrana hnací jednotky, a tím se předešlo vypnutí vypínačů trakční napájecí stanice. Naopak u soustav stejnosměrných je žádoucí, aby nejprve zapůsobil vypínač v napájecí stanici a zabránilo se tím odstranění poruchy pomocí vypínačů na vozidlech.

Pokud dojde vlivem poruchy k odpojení postiženého úseku sítě, používá se pro obnovení napájení a lokalizaci poruchy metoda tzv. automatického opětného zapnutí (OZ). Opětné zapnutí je obvykle současně spojeno s testem sítě na trvalý zkrat. Postup obnovení napájení je proto následující – po vypnutí vypínače v napájecí stanici musí do 3 sekund od ztráty napájení vypnout i automatické vypínače na palubě vlaku. Následuje další, v tomto případě 5 vteřin trvající prodleva, po které dochází k opětovnému zapnutí napájení a testování sítě na trvalý zkrat. Pokud během testu dojde k zotavení napětí v mezích stanovených pro příslušnou soustavu, mohou být po třech vteřinách od obnovení napájení znovu sepnuty hlavní vypínače hnacích vozidel.

Aby se zabránilo vysokému zapínacímu proudu ze strany trakční napájecí stanice v důsledku vícenásobného současného automatického opětného zapnutí identických typů vypínačů hnacích jednotek, je normou ČSN EN 50 388 doporučeno instalovat na palubě vlaku systém, který zajistí náhodné časové prodlevy (v rozsahu stovek milisekund) při OZ.

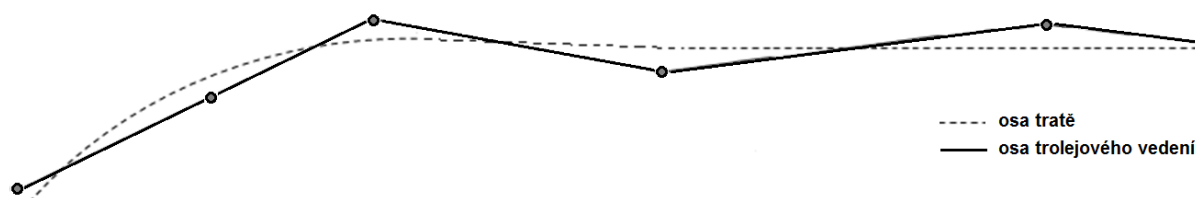
2.2 Geometrie trolejového vedení a jakost odběru proudu

Jestliže cílem systému napájení bylo zásobovat všechny vlaky elektrickou energií, úkolem této druhé skupiny pak je zajistit spolehlivý a nepřetržitý přenos elektrické energie ze systému napájení do drážních vozidel. Jednotné předpisy pro vzájemné působení trolejového vedení a pantografového sběrače (ať už jde o materiál troleje a smykadla, rozměry pantografové hlavice či jakost odběru proudu) jsou jedním z důležitých předpokladů interoperability. Patří proto jako nedílná součást do souboru požadavků TSI Energie a TSI Kolejová vozidla.

2.2.1 Geometrie trolejového vedení

Trolejové vedení musí být navrženo pro použití s pantografovými sběrači, jejichž parametry jsou uvedeny v následujících částech práce. Zásadní roli pro návrh geometrie vedení hraje zejména délka smykadla (někdy hovorově také nazývána jako šířka sběrače). Čím větší tato délka je, tím může být výraznější tzv. **klikatost** vedení.

S klesající klikatostí (tj. stranovou výchylkou trolejového vodiče vůči ose koleje) se zvětšuje i možná vzdálenost jednotlivých podpěr v obloucích, na druhé straně ale s délkou smykadla roste i mechanicko-kinematický obrys, a tím i prostorové nároky na průjezdný průřez např. v tunelech. Stranová výchylka vedení je obvykle vytvářena záměrně i v přímé trati za účelem rovnoměrného opotřebení smykadla sběrače. S ohledem na možné působení bočního větru musí být maximální výchylka pro jednotlivé délky sběrače stanovena s určitou rezervou a nelze proto při návrhu automaticky využít plný rozměr smykadla.



Obr. 2.6: Znázornění klikatosti vedení v oblouku a v přímé trati.

Druhým důležitým parametrem je **výška trolejového vedení**, ta se pohybuje standardně v rozmezí 5 080 – 6 200 mm s ohledem na maximální uvažovanou rychlost tratě. Základní pracovní výška by měla být, pokud možno, udržována konstantní. Je-li vzhledem k místním podmínkám (kupříkladu pod mosty) nutná změna výšky trolejového vodiče, musí jí být dosaženo co možná nejpozději.

Minimální výška trolejového vodiče musí být přitom vždy větší, než je výška rozšířeného obrysu vozidla. Protože zároveň nelze připustit přeskoky mezi trolejovým vodičem a uzemněnými částmi vozidel, je třeba navíc zohlednit minimální vzdušné vzdálenosti a nejmenší pracovní výšku sběrače. Při návrhu je vždy také nutné zohlednit i další vlivy, jako je zatížení vodiče námrazou, vliv teploty či toleranci výškové polohy koleje.

Maximální návrhová výška trolejového vodiče se určí na základě největší pracovní výšky sběrače, od níž se odečtou možné změny výšky trolejového vodiče směrem vzhůru. V úvahu musí být vzato například zdvižení vodiče sběračem, zdvih z důvodu opotřebení nebo dynamické pohyby trolejového vedení směrem vzhůru. [15]

2.2.2 Jakost odběru proudu

Vysoké kvality odběru proudu lze dosáhnout **trvalým mechanickým kontaktem** mezi trolejovým vodičem a smykadlem pantografového sběrače. Je-li tento kontakt přerušen, vzniká elektrický oblouk, který zvětšuje opotřebení trolejového vodiče i ližin pantografu. Jakost odběru proudu má proto zásadní vliv na životnost trakčního vedení a musí tedy splňovat dohodnuté a měřitelné parametry. Kvalita odběru proudu se prokazuje posouzením buď střední **přítláčné síly** F_m a příslušné směrodatné odchylky σ_{max} nebo **procentním poměrem jiskření** NQ .

Je-li pro hodnocení kvality odběru proudu použit procentní poměr jiskření, kritériem hodnocení musí být počet a doba trvání oblouků. Pokud je pro posouzení uvažováno hledisko střední přítláčné síly F_m , musí být trolejové vedení navrženo tak, aby sneslo horní mezní návrhovou hodnotu této síly. Střední přítláčná síla je statistickou střední hodnotou síly přítláčné a je tvořena dvěma hlavními složkami – statickou (působí při stání vozidla svisle nahoru na trolej a je dána působením zvedacího systému sběrače) a aerodynamickou (přídavná svislá síla na sběrač, daná působením proudícího vzduchu kolem komponentů pantografu). Limitní hodnoty obou těchto kritérií se liší v závislosti na požadované maximální provozní rychlosti a jsou souhrnně uvedeny v Tabulce 2.3.

Dalším důležitým parametrem z pohledu jakosti odběru proudu a vlivu na opotřebení trolejového vodiče i smykadla je vzájemná **kombinace materiálů** trakčního vedení a ližin pantografových sběračů. Nevhodná kombinace těchto materiálů má za následek nadměrné opotřebení trolejového drátu či smykadla.

Pro trolejové vedení se používá tažený materiál nebo válcovaný drát z mědi, slitiny mědi a stříbra, nebo z jiné slitiny mědi o definovaných mechanických a elektrických parametrech (viz ČSN EN 50 149). Lišty pantografu jsou obvykle měděné, uhlíkové, případně z uhlíku syceného kovovými částicemi [16].

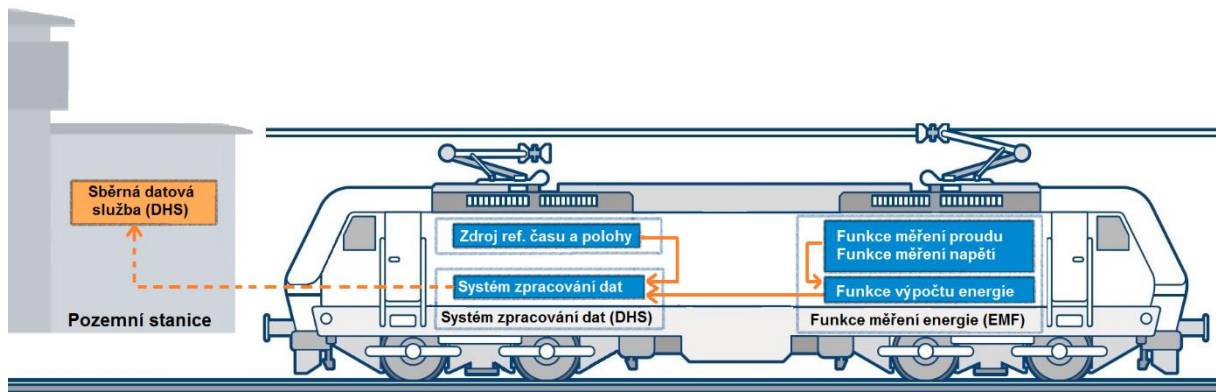
Trolejové vedení se navrhuje pro nejméně dva sousední provozované pantografové sběrače, přičemž minimální vzdálenost os hlav sousedních sběračů se liší podle traťové rychlosti a konstrukčního typu vedení a je rovna hodnotám stanoveným v TSI Energie, resp. ČSN EN 50 367. Pro soupravy s více sběrači musí být posouzeno provozní chování jak jednotlivého sběrače, tak skupiny současně činných sběračů jako celku.

Tab. 2.3: Minimální požadavky na jakost odběru proudu, údaje převzaty z [14].

Střední přítlačná síla			
Rychlostní kategorie	$v \leq 200$ km/h	$v > 200$ km/h	
Maximální hodnota AC (pro návrh)	$F_{max,AC} = 0,00047 \cdot v^2 + 90$ [N]	$F_{max,AC} = 0,00097 \cdot v^2 + 70$ [N]	
Minimální hodnota AC (pro schválení)	$F_{min,AC} = 0,00047 \cdot v^2 + 60$ [N]	$F_{min,AC} = 0,00047 \cdot v^2 + 60$ [N]	
Maximální hodnota DC (pro návrh)	$F_{max,DC} = 0,00097 \cdot v^2 + 110$ [N]	$F_{max,DC} = 0,00097 \cdot v^2 + 110$ [N]	
Minimální hodnota DC (pro schválení)	$F_{min,DC} = 0,00072 \cdot v^2 + 90$ [N]	$F_{min,DC} = 0,00072 \cdot v^2 + 90$ [N]	
Směrodatná odchylka (při nejvyšší traťové rychlosti)	$\sigma_{max} = 0,3 \cdot F_{max}$ [N]		
Procentní poměr jiskření			
Rychlostní kategorie	$v \leq 160$ km/h	160 km/h $< v < 250$ km/h	$v > 250$ km/h
Procentní poměr jiskření při nejvyšší traťové rychlosti (minimální doba hoření oblouku 5 ms)	$\leq 0,2$ %	$\leq 0,1$ % pro AC soustavy $\leq 0,2$ % pro DC soustavy	$\leq 0,1$ %

2.3 Systém sběru energetických údajů

Systém sběru energetických údajů má obecně dvě části – pozemní a palubní. Palubní systém měření energie (EMS) zahrnuje subsystém měření spotřeby (EMF), zajišťující měření proudu, napětí a výpočet energie a subsystém sběru a přenosu dat (DHS), starající se o shromáždění všech údajů a jejich přenos z trakčního vozidla do pozemní stanice. Pozemní část (DCS) má následně za úkol přijmout, uchovat, příp. exportovat data k dalšímu užití. Komunikace mezi oběma částmi probíhá standardně v rámci mobilní sítě GSM, resp. drážní GSM-R. [17] Celý princip je znázorněn na Obr. 2.7 na následující straně.



Obr. 2.7: Princip systému měření energie (EMS) na palubě vozidla a v pozemní stanici.

Měřením na palubě hnacího vozidla se zjišťuje množství odebrané nebo dodané činné a jalové energie z trakčního vedení. Délka měřících intervalů, za které je množství energie počítáno, je stanovena na dobu jedné minuty. Údaje jsou poté hromadně odesílány (zpravidla v intervalu 5 minut, nejdéle však 1x za 24 hodin) do pozemní stanice, kde musí být uchovávány po dobu nejméně 60 dnů. Každý záznam obsahuje kromě údajů o spotřebě ještě přesnou polohu vozidla z modulu GPS a pochopitelně i časový údaj označující okamžik, ke kterému se data vztahují. [17] Měření spotřeby, resp. zpětné dodávky elektrické energie do sítě představuje nezbytný předpoklad pro účtování elektřiny dle reálného odběru vozidla. Tím dochází ke zvýšené motivaci dopravců k optimalizaci její spotřeby a energetickým úsporám.

Velkých energetických úspor (v příměstské dopravě až okolo 40 % spotřebované energie) lze v tomto ohledu dosáhnout i využitím tzv. rekuperačního brzdění, proto bude tato problematika šířeji změna právě zde, v této souvislosti.

2.3.1 Rekuperační brzdění

Při rekuperaci lze zpětně využít brzdovou energii vytvořenou trakčním motorem pracujícím v generátorickém režimu. Aby mohlo docházet k brzdění pomocí rekuperace, musejí k tomu být vozidla i zdroje energie (trakční stanice, distribuční síť) technicky uzpůsobené. Podmínky pro vracení vyrobené energie zpět do sítě jsou značně odvislé od napájecí soustavy, v níž se vozidlo pohybuje.

Střídavé napájecí soustavy

Střídavé napájecí soustavy musí být dle směrnice TSI Energie navrženy tak, „Aby umožňovaly použití rekuperačního brzdění schopného bezproblémové výměny energie buď s jinými vlaky, nebo jakýmkoli jiným způsobem.“ [10] Spojením „jakýmkoli jiným způsobem“ se rozumí vracení energie zpět do veřejné sítě, skladování nebo přímé používání energie k jiným účelům nebo pro jiné odběratele. Energie nesmí být do sítě vracena, pokud je napětí v síti vyšší než U_{max2} (viz Tabulka 2.1), došlo ke ztrátě napájecího napětí nebo na daném napájecím úseku nastal zkrat mezi trakčním vedením a zemním potenciálem.

V síti 15 kV; 16,7 Hz je rekuperační brzdění široce rozšířené a bez problémů používané. V principu je to dáno obousměrnou průchodností trakční transformovny a zejména vlastní

jednofázovou rozvodnou sítí, propojující jednotlivé trakční napájecí stanice. To umožňuje přenášet rekuperovanou energii rozvodnou sítí z úseku, kde nebyla spotřebována, do jiné napájecí stanice. Díky sníženému kmitočtu, a tím i nízké induktivní reaktanci trakčního i napájecího vedení jsou rekuperující vozidla schopna si najít i značně vzdálené konzumenty elektrické energie, a to i bez potřeby příliš zvyšovat při brzdění napětí v trakční síti. Praktickým důsledkem této skutečnosti je fakt, že vozidla vybavená elektrodynamickou brzdou v podstatě téměř nepotřebují brzdové odporníky, protože skoro vždy se pro rekuperovanou energii najde v síti spotřeba.

Pokud jde o síť 25 kV; 50 Hz, zde je situace z pohledu rekuperace složitější. Jak již bylo popsáno v dřívějších kapitolách, tato proudová soustava je napájena přímo z všeobecné distribuční sítě, což samo o sobě přináší v rozvodu energetiky určité problémy z hlediska nerovnoměrného zatížení všech tří fází či nestálého odběru v čase. Z tohoto úhlu pohledu se proto nelze příliš divit nezájmu distributora vykupovat od drážních dopravců rekuperovanou elektrickou energii zpět. Navíc když její velikost, okamžik zahájení dodávky a dobu trvání nedokáže železnice předem přesně a závazně stanovit. Svou roli hraje jistě i finanční hledisko, kdy přirozenou snahou energetických společností je elektřinu vyrábět a následně prodávat, a nikoliv ji vykupovat zpět.

Obecně proto dle [13] rekuperace v ČR z trakční sítě od distribuční napájecí soustavy není dovolena. V praxi je situace taková, že trakční napájecí stanice jsou na vstupu osazeny zpětnou wattovou ochranou, která způsobí odepnutí napájecího bodu od distribuční sítě v případě toku proudu směrem z trolejového vedení do rozvodné soustavy. Protože rekuperující vozidlo nemá informaci o tom, zda jím dodávaná energie nalezne v napájeném úseku spotřebitele, nelze na dané části kolejové sítě v současnosti rekuperovat bez rizika nežádoucího vypnutí celého úseku. Vozidla tedy musí trvale mařit brzdovou energii v odporníku. Nepříznivá situace se však začíná pozvolna měnit. Od roku 2014 je zaveden zkušební provoz s rekuperací elektrických hnacích vozidel ve vybraných traťových úsecích, nacházejících se na distribučním území společnosti E-ON. Blokovací funkce zpětných wattových ochrann je zde odstavena a elektřina je bezúplatně distributorem odebírána.

Stejnoseměrné napájecí soustavy

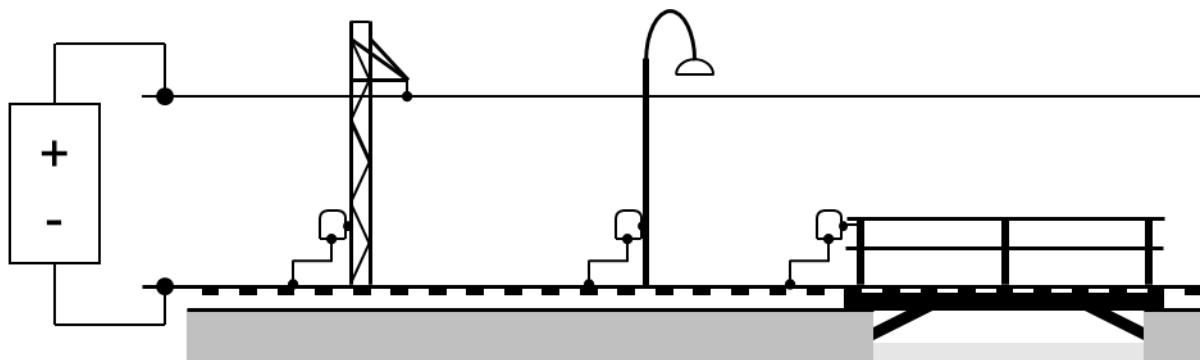
Stejnoseměrné napájecí soustavy musí být navrženy a provozovány tak, aby umožňovaly použití rekuperačního brzdění alespoň prostřednictvím výměny energie s jinými vlaky. Díky diodovým usměrňovačům v trakčních měničích nedochází k přetokům výkonu do energetické rozvodné sítě a k jejímu ovlivňování. Je však třeba zajistit, aby v napájecím úseku s rekuperujícím vozidlem byl další vlak, který dodávanou energii bude schopný spotřebovat. Podobně jako u střídavých soustav nesmí být energie do sítě vracena, pokud je napětí v síti vyšší než U_{max2} , došlo ke ztrátě napájecího napětí nebo na daném napájecím úseku nastal zkrat mezi trakčním vedením a zemí.

2.4 Ochranná opatření proti úrazu elektrickým proudem

Poslední ze čtyř základních bodů TSI Energie si klade za úkol stanovit ochranná opatření související se zajištěním bezpečnosti před úrazem elektrickým proudem. V tomto oddíle je proto stanoveno, že u každého systému trakčního vedení musí být ochrana před přímým

dotykem živých částí zajištěna dodržením minimálních předepsaných vzdušných vzdáleností (resp. pomocí ochrany zábranou, pokud tyto vzdálenosti nelze dodržet). Opatření se kromě samotného trakčního vedení týkají i všech živých částí zařízení vně vozidla jako jsou sběrače, vodiče, odporníky a podobně. Jednotlivé minimální odstupy, které je třeba u obou způsobů ochrany dodržet, jsou uvedeny v normě ČSN EN 50 121-1. Stejná norma zároveň stanovuje i limity střídavého a stejnosměrného dotykového napětí (jako funkci času) a definuje příklady opatření na snížení rizik z těchto napětí plynoucích. [18]

Současně je třeba dbát na dodržení bezpečných napětí i u prvků zpětné proudové cesty. K ní je nutno připojit veškeré neživé vodivé části nacházející se v prostoru sběrače a trakčního vedení. Přímé spojení neživých částí se zemí se provádí obvykle na tratích napájených střídavou sítí. Na tratích stejnosměrné trakce se realizuje spojení na zpětné kolejové vedení výhradně přes průrazku, tj. omezovač napětí, který zajišťuje vzájemné vodivé spojení po dobu, kdy je překročena přípustná hodnota tohoto napětí. Je tomu tak zejména z důvodu omezení nežádoucích vlivů bludných proudů u DC soustav.



Obr. 2.8: Naznačení principu ochrany neživých částí ve stejnosměrných soustavách ukolejněním přes průrazku. [39]

Zpětné vedení může být buď klasicky pouze kolejnicové (případ ČR) nebo je provedeno jako zesilovací vedení zpětné proudové cesty, tj. vedení instalované paralelně s kolejnicemi v hořejší části trakčních stožárů a v pravidelných vzdálenostech s nimi vodivě spojené. Díky tomuto uspořádání (zejména vzájemné blízkosti zpětných vodičů a trolejového vedení) se dosáhne výborná induktivní vazba, redukce magnetických polí, snížení napětí kolejí proti zemi a zároveň dochází k podstatně lepšímu rozdělení toku zpětných proudů. Současně vzniká univerzální zemnicí ochranná soustava, která se využívá pro elektrická zařízení nn i vn, pro zabezpečovací a sdělovací zařízení a pro ochranu proti přepětí (známá například v Německu jako takzvaná „Bahnerde“ – v normách do češtiny překládaná jako „země trakční soustavy“). U nás na většině tratí však vzhledem k použitému typu zabezpečovacího zařízení nelze tento princip použít. [3]

3 SUBSYSTÉM ŘÍZENÍ A ZABEZPEČENÍ

Jak již bylo zmíněno v úvodu, oblast řízení a zabezpečení zastřešuje všechna zařízení nezbytná k zajištění bezpečnosti, řízení a kontroly pohybu vlaků na železniční infrastruktuře. V následující kapitole proto budou zmíněny základní principy zabezpečovacích soustav na železnici, a to zejména ve vztahu k zařízením na drážních vozidlech a jejich vzájemné kompatibilitě.

Rozvoj železničních zabezpečovacích zařízení probíhal ve dvacátém století v různých Evropských zemích odděleně. V praxi to znamená, že v Evropě v současnosti existují ke čtyřem systémům energetického napájení železnic další přibližně dvě desítky různých systémů zabezpečovacích. V zásadě sice není teoreticky problém na vozidlo namontovat několik typů vlakových zabezpečovačů a radiostanic, nevyhnutelně to však vede k prostorovým potížím, a to jak při umísťování přijímačů na spodku vozidla či střešních antén, tak zejména při rozmísťování ovládacích a indikačních prvků těchto systémů na pultu v kabině strojvedoucího (a to navíc nehledě na vysokou cenu těchto zařízení). Tyto skutečnosti nevyhnutelně vedou k tomu, že se na jednotlivá trakční vozidla dosazují jen ta zabezpečovací zařízení, která na svých vozebních ramenech skutečně využijí.

Právě ona zmíněná (ne)kompatibilita tedy představuje zvláště v mezinárodní železniční dopravě poměrně palčivý problém a rozdílnost jednotlivých národních zabezpečovacích zařízení a radiostanic (souhrnně označovaných jako systémy třídy B) brání interoperabilitě lokomotiv a hnacích vozidel paradoxně ještě více než rozdílné trakční napájecí soustavy. Proto bylo v rámci evropského železničního prostoru rozhodnuto o vzniku jednotného celoevropského vlakového zabezpečovacího zařízení, nazývaného jako systém třídy A a postupným nahrazení původních systémů třídy B.

Protože je tedy budoucnost řízení a zabezpečení železniční dopravy spojena právě s tímto uceleným konceptem zařízení třídy A, bude i v následujícím textu věnován prostor zejména jednotnému evropskému systému. S podobným přístupem přichází rovněž i směrnice TSI CCS, kdy jednotlivé systémy třídy B jsou ponechány v kompetencích příslušných členských států a na evropské úrovni jsou stanoveny pouze požadavky na společný systém. Pokud se tedy budeme dále opět držet (podobně jako v případě subsystému ENE) struktury uvedené ve směrnici TSI, pak můžeme **oblast řízení a zabezpečení rozčlenit** na následující části: [19]

- **Vlakové zabezpečovací zařízení**
- **Rádiová hlasová komunikace**
- **Rádiová datová komunikace**
- **Detekce vlaků**

Systémem vlakového zabezpečovacího zařízení třídy A je systém **ETCS** (*European Train Control System*) a rádiovým systémem třídy A je systém **GSM-R** (*Global System for Mobile Communications – Railway*), někdy souhrnně označovány zkratkou **ERTMS** (*European Rail Traffic Management System*). Systém detekce vlaků pak využívá stávajících prvků infrastruktury (zejména kolejových obvodů či počítačů náprav) a s vlakovým zabezpečovacím zařízením komunikuje přes definovaná standardizovaná rozhraní.

3.1 Evropský systém řízení železničního provozu „ERTMS“

Myšlenka jednotného evropského systému řízení železničního provozu pochází z počátku 90. let 20. století, kdy byl na podnět mezinárodní železniční unie (UIC) v roce 1991 projekt ERTMS zahájen. Samotná zabezpečovací zařízení se však pochopitelně na železnici využívají mnohem déle. Na našem území je například od šedesátých let minulého století jednotně používán liniový vlakový zabezpečovač označovaný jako LS. Tento systém přenáší v omezeném rozsahu informaci o návěsti, k níž se vlak přibližuje a požaduje potvrzení bdělosti strojvedoucího. Jednou ze základních nevýhod systému je však velmi omezený rozsah komunikace mezi infrastrukturou a vozidlem, kdy například neexistuje možnost přenosu informace o traťovém rychlostním limitu či dohlížení na skutečnou rychlost vlaku. Pro rádiovou komunikaci pak na národní úrovni slouží analogový systém TRS (Traťový Rádiový Systém).

Už z předchozího popisu je možná patrné, že mezi aktuálním stavem techniky, reprezentovaným vlakovým zabezpečovačem ETCS spolu se sítí GSM-R, a realitou desítky let starých národních systémů třídy B je propastný rozdíl – a to jak v oblasti bezpečnosti, tak i v oblasti funkčnosti. Vzhledem k těmto okolnostem bylo na území ČR rozhodnuto – podobně jako v ostatních evropských státech – systémy třídy B opustit a nadále se věnovat pouze vývoji jednotného evropského zabezpečovacího systému.

Za základní rozdělení systému ETCS, resp. GSM-R se považuje **členění na traťovou** (infrastrukturní) a **palubní** (mobilní) část. Obě části pak zahrnují příslušné prvky podle zvolené aplikační úrovně (o aplikační úrovni viz dále).

3.1.1 Infrastrukturní část

Do traťové části lze zahrnout zejména následující prvky infrastruktury:

- **Balízy** (*Eurobalise*) a **smyčky** (*Euroloop*)
- **Radiobloková centrála – RBC** (*Radio Block Center*)
- **Rozhraní vůči infrastrukturnímu zabezpečovacímu zařízení – LEU** (*Lineside Electronic Unit*)

Balízy a smyčky

Název balíza vychází z francouzského slova pro bóji (*Balise*) a skutečně jde o určitou formu radiomajáku, kdy balíza slouží k bodovému přenosu dat z tratě na vozidlo. Samotná balíza není napájena a energie je jí dodána prostřednictvím elektromagnetického pole o kmitočtu 27 MHz, vytvořeného anténou umístěnou na projíždějícím kolejovém vozidle. Jakmile je balíza aktivována, vysílá opakovaně telegram zpět kolejovému vozidlu v kmitočtovém pásmu přibližně 3,9 MHz (pro logickou nulu) a 4,5 MHz (pro logickou jedničku). Informace odesílaná balízou může obsahovat tzv. pevná data (tedy stálé informace např. o topografii tratě) či data proměnná (např. informace o návěstních znacích). Data jsou na balízu přenášena ze zařízení sloužících k propojení systémů *Eurobalise* a *Euroloop* s infrastrukturním zabezpečovacím zařízením – ty jsou označovány jsou anglickou zkratkou

LEU (*Lineside Electronic Unit*). Balízy se obvykle sdružují do balízových skupin, kdy se každá skupina skládá z jedné až osmi těchto *Eurobalise*. Většinou se však skupiny navrhují v minimálním počtu dvou balíz, a to z toho důvodu, aby bylo možné určit směr jízdy vozidla.

Smyčka *Euroloop* pak infrastrukturu na vhodných místech (nejčastěji úseky častých zastavení) doplňuje o liniový přenos informace o postavení návěstidla a řeší tak částečnou nevýhodu balíz v podobě pouze bodového předávání informace. Smyčku tvoří vyzařovací kabel, umístěný v patě kolejnice, který je podobně jako balíza uváděn do činnosti prostřednictvím elektromagnetického pole vytvářeného anténou umístěnou na kolejovém vozidle. Zařízení po uvedení do činnosti cyklicky vysílá (na frekvencích 11 až 16 MHz tak, aby nedocházelo ke vzájemnému rušení se systémem balíz) telegramy palubnímu zařízení. Na počátku každé smyčky *Euroloop* je umístěna balízová skupina indikující přítomnost tohoto zařízení. [5]



Obr. 3.1: Balízová skupina tvořená dvěma *Eurobalise* (vlevo) a kabel smyčky *Euroloop* umístěný v patě kolejnice (vpravo). [40]

Radiobloková centrála

Radiobloková centrála je ústředním zařízením vlakového zabezpečení, kontroluje trasu a polohu přidělených vlaků na trati a vydává jim tzv. oprávnění k jízdě – MA (*Movement Authority*). Ve vyšších aplikačních úrovních zároveň prostřednictvím rádiového modulu GSM-R zprostředkovává vzájemnou komunikaci s palubními jednotkami kolejových vozidel. Centrála také komunikuje přes definovaná rozhraní s elektronickým stavědlem a infrastrukturním zabezpečovacím zařízením a v neposlední řadě i se sousedními RBC a provádí vzájemné předávání vlaků. [41]

Rozhraní vůči infrastrukturnímu zabezpečovacímu zařízení

Jak již bylo dříve uvedeno, rozhraní LEU slouží k propojení systémů *Eurobalise* a *Euroloop* s infrastrukturním zabezpečovacím zařízením. Nejedná se však o standardizovaný subsystém, protože rozhraní vůči infrastrukturnímu zabezpečovacímu zařízení se odlišuje podle typu zařízení, na které je LEU navázáno (může být snímána poloha kontaktů relé, proudy tekoucí v obvodech signálních světel apod.). Prvky toho systému je možno umísťovat decentralizovaným způsobem podél trati, případně centrálně na stavědlové ústředně. [41]

3.1.2 Palubní část

Do mobilní části lze zahrnout zejména následující systémové prvky na palubě železničních vozidel:

- **Palubní počítač – EVC** (*European Vital Computer*)
- **Rozhraní vůči strojvedoucímu – DMI** (*Driver Machine Interface*) a **vůči systému řízení vlaku – TIU** (*Train Interface Unit*)
- **Modul pro komunikaci s balíziemi – BTM** (*Balise Transmission Module*)
- **Systém odometrie** (stanovení polohy)
- **Záznamové zařízení – JRU** (*Juridical Recording Unit*)

Palubní počítač

Palubní počítač tvoří jádro celé mobilní části systému ERTMS a jeho hlavním účelem je zpracování dat a komunikace přes definovaná rozhraní se systémy odometrie, rozhraním řízení vlaku, rozhraním vůči strojvedoucímu, záznamovým zařízením a přenosovým zařízením pro komunikaci s balíziemi. Ve fázi přechodu ze zabezpečovacích systémů třídy B na systém třídy A může být součástí případně také modul STM (*Specific Transmission Module*) pro komunikaci s původními národními zabezpečovači. EVC je také přímo napojen na rádiovou stanici GSM-R, ze které přijímá a zpracovává jednotlivé příkazy, a naopak vysílá informace o konfiguraci a stavu vlaku do radioblokové centrály. Konstrukční provedení palubního počítače pro konkrétní drážní vozidlo navrhuje výrobce, musí však respektovat požadavky na chování a bezpečnost systému. [5]

Rozhraní vůči strojvedoucímu a vůči řízení vlaku

Rozhraní DMI pro obsluhu systému strojvůdcem je tvořeno zařízením s dotykovou obrazovkou, předávající optické a akustické výstupy ze systému obsluhujícímu personálu. Pomocí displeje jsou zobrazovány informace o průběhu jízdy vlaku, maximální přípustné rychlosti, délce úseku s povolením k jízdě a obrazovka slouží i pro veškerá další textová hlášení ze systému. Prostřednictvím DMI jsou dále zadávány i údaje o vlaku, výběr jazyka a test systému.

Naopak rozhraní TIU slouží pro komunikaci a předávání povelů ze systému ETCS do řídicího softwaru daného trakčního vozidla (např. povel k brzdění vlaku při vyhodnocení potencionálně nebezpečného stavu). [41]

Systém odometrie

Systém odometrie je zodpovědný za správné určování ujeté vzdálenosti. Zpravidla je z důvodu redundance tvořen dvěma nezávislými systémy – obvykle kontaktním odometrem na nápravě (Obr. 3.2) a bezkontaktním Dopplerovým radarem. Oba systémy přitom udávají okamžitou rychlost a ujetou vzdálenost od posledního referenčního bodu (traťové balízy).

Dopplerův radar je založen na principu vysílání svazku mikrovln šikmo od hnacího vozidla, kdy se tyto vlny odráží od podloží tratě a jsou radarem opětovně zachycené.

Na základě relativního pohybu mezi vozidlem a zemí je přijatá vlna frekvenčně posunutá – tento posun je měřítkem pro aktuální rychlost a ujetou vzdálenost. Oproti tomu kontaktní odometr (impulzní vysílač) na nápravě registruje změnu otáček i směru otáčení a na základě toho vysílá impulzy do EVC. Centrální počítač z těchto údajů opět dokáže vypočítat ujetou dráhu a aktuální rychlost i stanovit současný směr jízdy a momentální zrychlení. [42]



Obr. 3.2: Příklad provedení kontaktního odometru na nápravě vozidla od výrobce SKF. [42]

Modul pro komunikaci s balízami

Modul BTM je umístěný na podvozku vozidla a vysílá nepřetržitě signál o kmitočtu 27 MHz k napájení balíz či smyček, a naopak zpětně přijímá telegramy z těchto infrastrukturních prvků, které předává do palubního počítače EVC. [41]

Záznamové zařízení

Záznamové zařízení je vlastně „černou skříňkou“ vlaku a jsou do ní ukládány nejdůležitější údaje a provozní parametry o průběhu jízdy za účelem možného zpětného vyhodnocení, a to zejména pro právní účely. Do JRU jsou mimo jiné ukládány i informace o zaslaných telegramech mezi infrastrukturní částí zabezpečovacího zařízení (balízami) a vozidlem. [41]

3.1.3 Aplikační úrovně

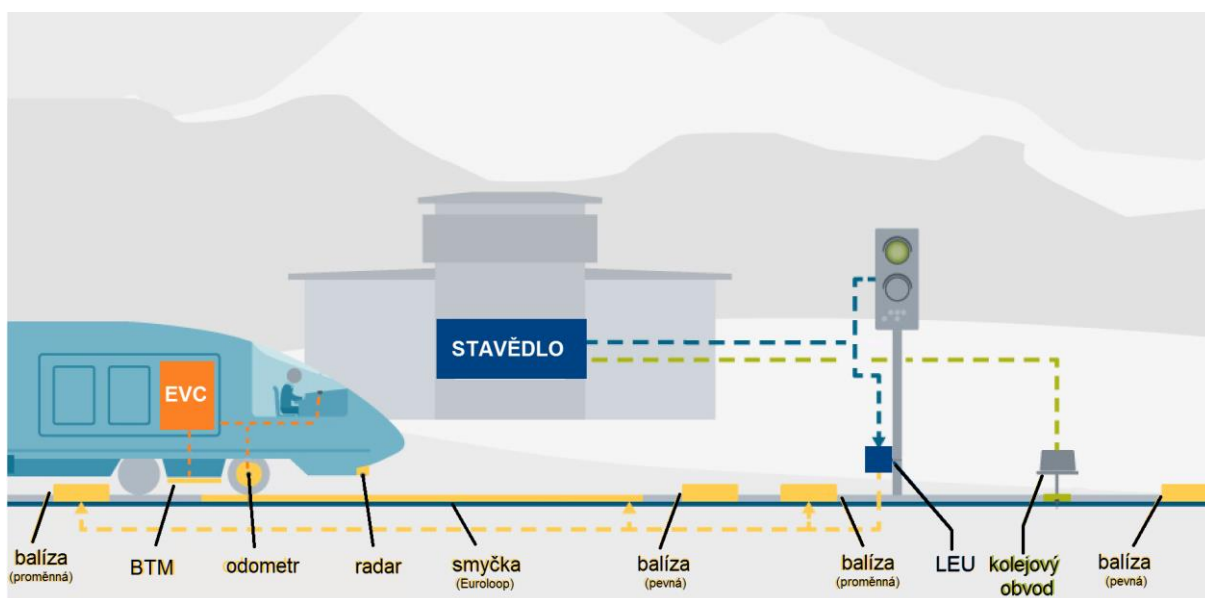
V průběhu vývoje systému ERTMS, resp. ETCS byly vytvořeny tři základní aplikační úrovně, které v různé míře využívají výše uvedených infrastrukturních a mobilních prvků. Vozidlo vybavené palubní částí vlakového zabezpečovacího zařízení pro danou aplikační úroveň musí být schopno provozu na této úrovni a na všech úrovních nižších.

ETCS L1

Aplikační úroveň L1 (*Level 1*) je do určité míry doplněním klasického infrastrukturního zabezpečovacího zařízení. Zjišťování volnosti či obsazenosti kolejových úseků je stále úkolem konvenčních systémů pro detekci vlaků (tj. kolejových obvodů nebo počítačů náprav). Na trati jsou dále osazeny proměnné (přepínatelné) balízy, resp. balízové skupiny, které mají funkci referenčního bodu a zároveň předávají hnacímu vozidlu informace o návěstním znaku

následujícího návěstidla. Přepínatelné balízy jsou kabelovým vedením propojeny s jednotkami LEU, které tvoří rozhraní s prvky infrastrukturního zabezpečovacího zařízení.

Aby byla odstraněna nevýhoda bodovosti systému (informaci o návěsti obdrží palubní jednotka pouze v okamžiku míjení balízové skupiny a dále již vozidlo nemá možnost informaci aktualizovat), jsou zpravidla v úseku před hlavním návěstidlem doplněny další proměnné balízy, či se s výhodou používá liniového řešení v podobě smyčky *Euroloop*, která nepřerušovaně předává vozidlu informaci o blížícím se návěstním znaku, resp. jeho změně.



Obr. 3.3: Princip fungování systému ETCS Level 1, podklad převzatý z [43].

ETCS L2

Aplikační úroveň L2 (*Level 2*) stále využívá prvků konvenčních systémů pro detekci vlaků, kdy tato zařízení vykonávají nadále svoji činnost v oblasti zjišťování přítomnosti a celistvosti vlaku (podobně jako tomu bylo před zavedením systému ETCS). Tyto informace jsou následně předávány do stavědlové ústředny a z ní do radioblokové centrály systému ERTMS, která na jejich základě následně uděluje povolení k jízdě kolejovému vozidlu.

Základní rozdíl oproti předchozím systémům spočívá právě v udělování povolení k jízdě (tzv. MA – *Movement Authority*), kdy jsou tato oprávnění pro následující traťový úsek předávána vozidlu z radioblokové centrály prostřednictvím rádiového systému GSM-R, a nikoli návěstidly na trati. V zájmu zjednodušení architektury systému a rovněž vzhledem k možnému snížení provozních nákladů je od jejich instalace dokonce v této úrovni možno upustit. Nezbytnou podmínkou však je, aby všechna vozidla pohybující se na dané infrastruktuře byla palubní částí aplikační úrovně nejméně L2 vybavena.

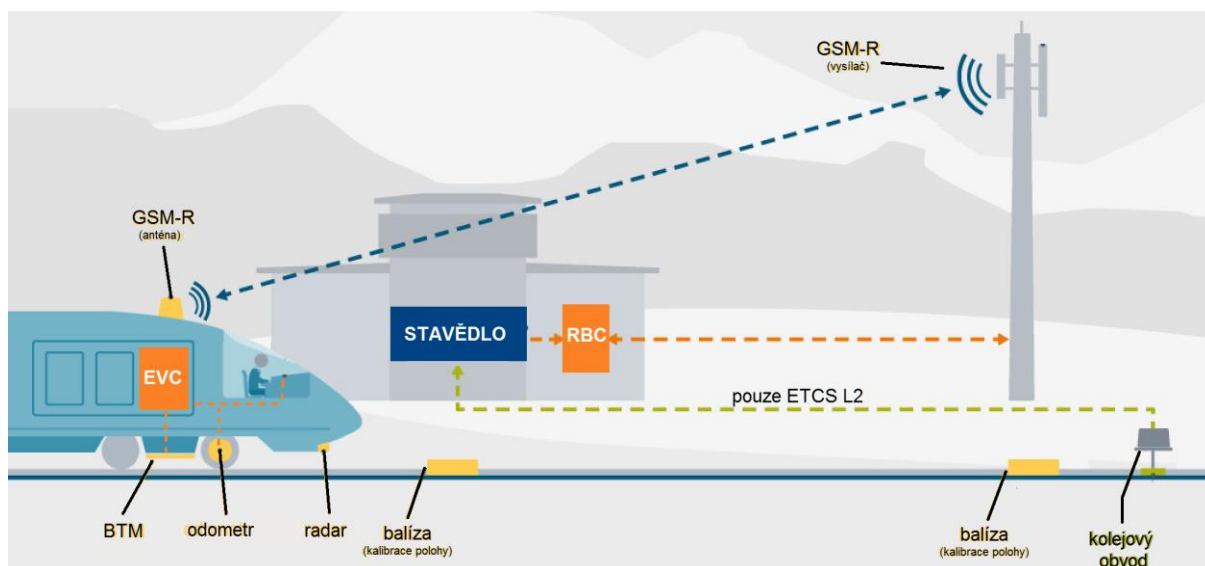
Díky oboustrannému komunikačnímu prostředí, založenému na technologii GSM-R, může dále systém vykonávat průběžný dohled nad okamžitou rychlostí vozidla, provádět srovnání s rychlostí v daném místě povolenou a v případě překročení této dovolené hodnoty provést příslušný zásah.

Traťové balízy se používají neproměnné a slouží pouze jako tzv. referenční body pro orientaci kolejového vozidla a zpřesňují informaci o poloze získanou ze systému odometrie. Určování aktuální polohy vlaku tedy neprobíhá striktně bodově, ale jedná se o úsekové měření. Při určování oblasti, v níž se vlak nachází, je třeba brát v úvahu nejistoty v měření odometru a v určení polohy balízové skupiny. Úsek tedy není omezen přesně čelem a koncem vlaku, ale je rozšířen o určitou rezervu – tzv. *Confidence interval*.

Každá zpráva o poloze vlaku, kterou zasílá palubní zařízení do RBC v zásadě musí obsahovat údaj o vzdálenosti mezi čelem vozidla a poslední projetou balízovou skupinou, úsek, v němž se vlak nachází (tj. *Confidence interval*) a polohu čela vlaku. Dále pak i informaci o aktuální rychlosti a směru jízdy vlaku vzhledem k orientaci balízové skupiny (vždy včetně identifikace balízy, k níž je měření vztahováno). Tyto informace jsou vozidlem zasílány v předem definovaných situacích (zastavení vozidla, změna směru jízdy, přejezd mezi oblastmi řízenými odlišnými RBC atd.) či pokaždé, když o to radiobloková centrála požádá.

ETCS L3

Aplikační úroveň L3 (*Level 3*) znamená rozšíření systému o další funkce. V této fázi již odpadají konvenční technické prostředky (kolejové obvody, počítače náprav) pro kontrolu volnosti nebo obsazenosti kolejových úseků – rušení závěrů jízdní cesty probíhá v závislosti na informacích od vlaků. Zároveň není třeba ze strany infrastruktury zajišťovat ani kontrolu celistvosti vlakové soupravy. Funkce detekce integrity vlaku se stává úkolem vlastního palubního zařízení na vozidle a je spolu s ostatními údaji zasílána na radioblokovou centrálu a na základě toho RBC nakládá s vlakem jakožto se souvislou jednotkou.



Obr. 3.4: Princip fungování systému ETCS *Level 2* a *Level 3*, podklad převzatý z [43].

Již první praktické zkušenosti s využitím techniky a možností ERTMS, získané zejména při jízdách na tratích v zahraničí, vybavených jednotným evropským vlakovým zabezpečovačem (zejména aplikační úrovně L2), ukázaly zcela nové možnosti řízení vlakové dopravy. Jízda pod plným dohledem systému ETCS umožňuje zvýšení rychlosti jízdy vlaků, vzhledem

k nepotřebnosti signálních prvků neexistuje nebezpečí přehlédnutí či nerespektování návěsti a dochází ke zvýšení propustnosti tratí jízdou vozidel v těsnějším sledu. K dalším obecně známým přínosům ETCS patří i úspory energie v důsledku efektivního řízení jízdy vlaku díky včasné znalosti rychlostního profilu úseku trati před vozidlem.



Obr. 3.5: Plán postupného zavádění ETCS L2 v ČR. [44]

3.2 Detekce vlaků

Ačkoli by se dle předchozího popisu mohlo zdát, že s příchodem zabezpečovacího systému ETCS L3 se stanou současné infrastrukturní systémy pro detekování vlaků nepotřebnými, vede k tomuto cíli ještě dlouhá cesta a patrně se s těmito prvky budeme (ať už v jakékoli formě) setkávat ještě celou řadu let. Detekční systémy jsou tak v aktuálním znění směrnice TSI [19] nedílnou součástí traťového subsystému CCS. Mezi základní používané způsoby detekce toho, zda je úsek tratě volný nebo obsazený, patří **kolejové obvody a počítače náprav**.

3.2.1 Kolejové obvody

Kolejové obvody patří mezi nejstarší samočinné detekční prostředky kolejových vozidel. Jak už název napovídá, detekce přítomnosti vozidla probíhá prostřednictvím kolejnic, které slouží jako hlavní vodiče obvodu. Vlak při obsazení úseku kolejnice propojí svými elektricky vodivými dvojkolími, a tím uzavře elektrický obvod – jedná se o tzv. vlakový šunt. Elektrický odpor šuntu je značně neurčitý, protože se zde uplatňuje jednak odpor dvojkolí, a zejména přechodový odpor mezi kolem a kolejnicí. Hodnota odporu také je silně závislá na počtu náprav vlaku, hmotnosti železničních vozů, stavu kol a kolejnic (tj. nečistoty, rez), konstrukčním řešení brzd a dalších faktorech. Jedním z důležitých parametrů kolejových obvodů, který je za tímto účelem udáván je proto tzv. **šuntová citlivost**, tj. nejvyšší hodnota

odporu šuntu, při které i při nejnepříznivějších provozních podmínkách dojde ke správnému vyhodnocení obsazenosti koleje. Každé drážní vozidlo musí být dle [20] konstruováno tak, aby bylo ve všech případech detekováno kolejovými obvody se šuntovou citlivostí min. $0,1 \Omega$ (dle aktuální edice citované normy se pak pro všechny typy nových kolejových obvodů doporučuje hodnota min $0,2 \Omega$).

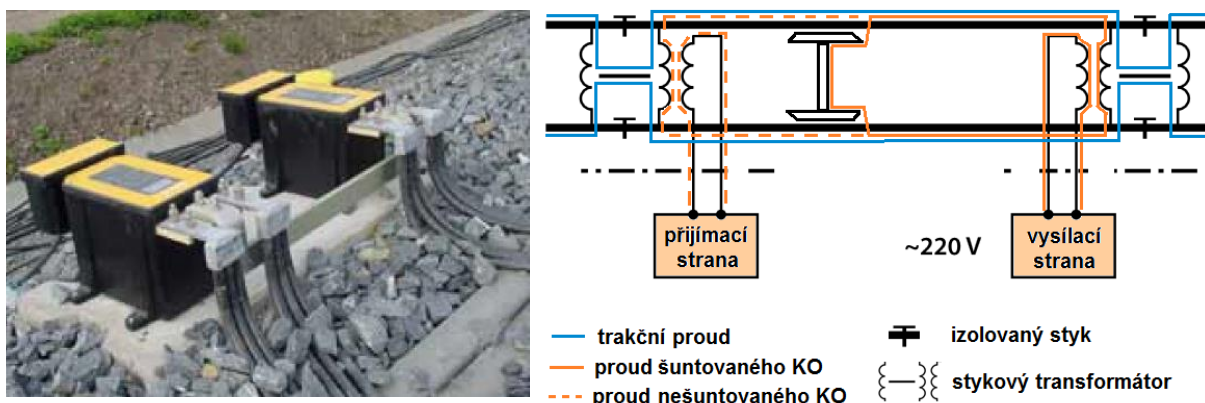
Každý kolejový obvod má vysílací stranu pro napájení a přijímací člen pro snímání a vyhodnocování svého stavu. Při vhodném uspořádání umožňuje současně přenášet kód vlakového zabezpečovacího zařízení na hnací vozidlo a může sloužit i jako obvod pro detekci lomu kolejnice.

V zásadě existují **dva hlavní způsoby uspořádání** kolejových obvodů – sériový a paralelní:

- **Sériový kolejový obvod** má vysílací a přijímací stranu spolu s nápravou vozidla zapojenou do série. Jeho kolejové relé je v základní poloze odpadlé. Po vjetí vozidla do daného úseku se obvod uzavře a relé přitáhne. Tento přístup se používá např. na spádovištích. Jeho nevýhodou je to, že se možná porucha obvodu (např. přerušeni elektrického obvodu, lom kolejnice) nijak neprojeví, pokud není obvod obsazen.
- **Paralelní kolejový obvod** má na jedné straně úseku zapojenu napájecí stranu a na opačném konci stranu snímací. Obvod kolejového relé je propojen přes kolejnicové pásy, a proto je relé přitažené. Vjede-li vozidlo do kolejového obvodu, svými nápravami zkratuje napájecí stranu, na relé zbývá malý proud, a to odpadne. Tento typ indikace je velmi bezpečný, protože jakákoli porucha způsobí odpadnutí relé, takže se úsek trati jeví jako obsazený.

Pokud se nejedná o speciální typ neohrazených kolejových obvodů, je každý úsek vymezen tzv. **izolovanými styky**. Ty musí jednak zajistit dostatečnou elektrickou izolační pevnost při zachování dobrých mechanických vlastností, a na druhé straně je přes ně potřeba převést zpětný topný a trakční proud mezi elektrickým vozidlem a napájecí stanicí, resp. u vozů s elektrickým vytápěním zpětný proud mezi vozy a lokomotivou. V praxi se opět používají **dva různé možné přístupy** – jednopásové a dvoupásové kolejové obvody:

- **Jednopásové kolejové obvody** označují případy, kdy se zpětná proudová cesta uzavírá v každém úseku vždy pouze po jedné kolejnici a v místě rozhraní mezi dvěma sousedními kolejovými obvody přejde pomocí příčné (kosé) propojky přes izolovaný styk na opačnou kolejnici.
- **Dvoupásové kolejové obvody** se od jednopásových odlišují tím, že obvod zpětného proudu se uzavírá oběma kolejnici. Na konci každého izolovaného úseku se nachází tzv. stykový transformátor, jehož střed je vyveden a spojen se středem vinutí stykového transformátoru sousedního kolejového obvodu. Zpětný trakční a topný proud se tak do signálních obvodů nepřenáší, protože prochází vinutím transformátoru navzájem vždy opačným směrem (od kolejnice ke středu vinutí, nebo opačně). Výše uvedené platí za předpokladu dokonalé symetrie proudů v obou kolejnících – v praxi se za provozně dosažitelnou považuje asymetrie 10 %, k té se přihlíží i při konstrukci a zkoušení obvodů. [20]



Obr. 3.6: Paralelní kolejový obvod s propojením jednotlivých izolovaných úseků pomocí stykových transformátorů, vlevo pak samotný stykový transformátor, podklad převzatý z [45].

Jak už je pravděpodobně z předchozího textu patrné, z elektrického hlediska kolejnice neslouží pouze jedinému účelu, ale setkávají se v nich zpětné trakční proudy se signály kolejových obvodů železničních zabezpečovacích zařízení. Jejich vzájemné ovlivňování plyne především z galvanického propojení zmíněných systémů. Nesouměřitelnost přenášených výkonů přitom znevýhodňuje právě kolejové obvody.

S cílem zmíněnému ovlivňování zabránit, lépe řečeno ho alespoň omezit, byly zvoleny pro kolejové obvody jiné frekvence, než jaké odpovídají trakčnímu napájecímu napětí. Poměrně značná komplikace však spočívá v tom, že rozvoj železničních zabezpečovacích zařízení probíhal ve dvacátém století v různých evropských zemích odděleně. To způsobilo, že k jednomu základnímu kmitočtu napájecí sítě není přiřazena jediná odlišná frekvence kolejových obvodů zabezpečovacích zařízení, ale velké množství kmitočtů různých. V praxi to znamená, že v Evropě v současnosti existuje ke čtyřem systémům energetického napájení železnic zhruba stovka kmitočtů vyhrazených v různých státech pro zabezpečovací zařízení, a tedy se striktními limity pro zpětný trakční proud. Přehled nejdůležitějších ochranných kmitočtových pásem na našem území je uveden v Tabulce 3.1.

Mezi **nejvýznamnější zdroje rušivých vlivů**, způsobující problémy s kompatibilitou zabezpečovacích zařízení patří: [46]

- **Zpětný trakční proud**
 - Vozidla
 - Napájecí stanice
- **Zpětný topný proud**
- **Nevhodné ukolejnění**
- **Vlivy okolních elektroenergetických systémů**

Zpětný trakční proud

Spektrum rušivých kmitočtových složek ve zpětném trakčním proudu je závislé na celé řadě faktorů, **dominantní vliv** však má použitý **typ hracího vozidla a samotná napájecí soustava**.

Vozidla

V případě hnacího vozidla je rozhodující typ trakčního motoru a způsob jeho regulace. Vzhledem k poměrně rychlému rozvoji oboru výkonové elektroniky a trakčních pohonů ve 20. století, se na železnici používá celá škála vozidel z různých vývojových období s odlišnými přístupy k řešení trakčních obvodů a s výrazně rozdílným spektrem rušivých vlivů, odrážejícím tehdejší stav techniky.

Od nejstarších vozidel se stejnosměrnými sériově buzenými trakčními motory a odporovou regulací pomocí změny napájecího napětí a buzení, kde rušivé proudy odpovídaly použitým neřízeným usměrňovacími členům (u stejnosměrné trakce usměrňovači v měničném, u střídavé usměrňovači na vozidle), přes stejnosměrné cize buzené motory s pulzní tyristorovou regulací, kde rušivé vlivy byly primárně dány kmitočtovými složkami, rovnajícími se nosnému kmitočtu pulzního měniče a jeho násobkům (viz známý způsob spínání pulzních měničů ČKD na elektrických lokomotivách ČD s řídicími kmitočty 33 Hz, 100 Hz a 300 Hz), dospěl současný vývoj techniky až k lokomotivám s třífázovými asynchronními motory, napájenými z trakčních měničů, osazených kaskádně řazenými výkonovými IGBT tranzistory. Vlastní trakční měniče pracují s poměrně vysokými řídicími kmitočty v řádu kHz, umožňujícími (na střídavé trakci v kombinaci s čtyřkvadrantovými vstupními měniči) odběr proudu, který je blízký sinusovému a současně ve fázi s napětím. Pracují tedy s přibližně jednotkovým účinníkem.

Problém s kompatibilitou obecně u bezkomutátorových trakčních motorů však spočívá v tom, že na rozdíl od pulzních měničů, které je možno spínat pevnou frekvencí – navíc záměrně odlišnou od kmitočtu obvodů zabezpečovacích zařízení – prochází střídavá složka zpětného trakčního proudu u asynchronních frekvenčně řízených pohonů při rozjezdu spojitě celým spektrem od kmitočtu nulového až po maximální (frekvence napájecího napětí je úměrná otáčivé rychlosti motoru, a tedy rychlosti jízdy vozidla). Může tedy potenciálně zasahovat i do oblastí pro vozidla zakázaných, tedy do kmitočtových spekter vyhrazených zabezpečovací technice.

Pro snížení těchto nežádoucích účinků se používá do obvodu vřazený filtrační LC člen. Zvláštností České republiky však je, že z důvodu v padesátých a šedesátých letech instalovaných a dodnes používaných kolejových obvodů o frekvencích 25 a 50 Hz (v současnosti se již řadu let používá systém 75 Hz a zejména 275 Hz, nové instalace obvodů o nižších kmitočtech jsou zakázány [20], [21]) je vyžadována nízká úroveň rušivých proudů i v oblasti těchto nejnižších frekvencí. To přináší komplikace zejména z důvodu dřívější zvyklosti používat k filtrování střídavých složek vstupního proudu polovodičových měničů pasivní prvky, tj. tlumivky a kondenzátory. Protože reaktance tlumivek a admitance kondenzátorů roste úměrně frekvenci zpětného proudu, daří se pasivními LC filtry celkem uspokojivě utlumit kmitočty v řádu stovek Hz. Pro náležité potlačení střídavých složek zpětného proudu o frekvencích v nízkých desítkách Hz však vycházejí příslušné filtrační kondenzátory a tlumivky nereálně velké a je nutné vozidla vybavovat filtry aktivními, které jsou koncipovány jako elektronické proudové zdroje, kompenzující nežádoucí střídavé složky. Samozřejmě každé takové zařízení vozidlo komplikuje a prodražuje, bezpečnost však ohrozit nelze a do doby úplné náhrady starších kolejových obvodů půjde pravděpodobně o jediné možné řešení.

Napájecí stanice

Pokud se v dalším textu nyní zaměříme na rušivé vlivy dané činností napájecích stanic, je pravděpodobně zřejmé, že budou primárně odvozené od typu napájecí soustavy a od způsobu zapojení trakční napájecí stanice.

Ve zpětném trakčním proudu se obecně vyskytují všechny složky, které jsou obsaženy již v primární napájecí síti. Vedle základního kmitočtu rozvodné soustavy, tj. 50 Hz i jeho vyšší harmonické násobky, ale také další signály, jako např. kmitočty hromadného dálkového ovládání (HDO), pro které se v ČR používají nejčastěji telegramy o frekvencích 183,33 Hz nebo 216,67 Hz.

Stejnoseměrné soustavy navíc obsahují zbytková zvlnění, pocházející z trakčních usměrňovačů v měničích. V našich podmínkách se používají dvanáctipulzní trakční usměrňovače, a tedy typický je výskyt složky 600 Hz a všech jejích lichých vyšších násobků (v menší míře i sudých). Obecně také u stejnosměrných sítí dochází k posunu původní frekvence rušivého signálu o $\pm n \cdot 50$ Hz, protože v závislosti na konstrukci n-fázového usměrňovače nastává při usměrňování síťového proudu vlastně jejich amplitudové nebo frekvenční klíčování právě sítíovou frekvencí.

Tab. 3.1: Ochranná kmitočtová pásma pro kolejové obvody, údaje převzaty z [20].

Vyhrazená pracovní kmitočtová pásma pro starší kolejové obvody	Limit vozidlového rušivého proudu
48–52 Hz	0,26 A
72–76 Hz	0,11 A
266–276 Hz	0,13 A
9,5–10,5 kHz	N.A
14,5–15,5 kHz	N.A
48–52 kHz	N.A
Vyhrazená pracovní kmitočtová pásma pro perspektivní kolejové obvody	Limit vozidlového rušivého proudu
73–77 Hz	1 A
274–276 Hz	0,5 A
48–52 kHz	N.A

Zpětný topný proud

V případě elektrických souprav je topení v osobních vozech zajištěno prostřednictvím průběžného napájecího topného kabelu z lokomotivy, zpětná cesta topného proudu se pak uzavírá kolejnicemi. U stejnosměrných soustav je kabel napájen přímo trakčním stejnosměrným napětím 3 kV, na střídavé trakci pak odbočkou z transformátoru o napětí 3 kV či 1,5 kV.

Na hnacích vozidlech nezávislé trakce se pro elektrické topení a centrální napájení vozů elektrickou energií používá topný alternátor s můstkovým usměrňovačem, poháněný trakčním spalovacím motorem. Systém musí být koncipován tak, aby základní harmonická složka topného proudu při normálním provozním stavu byla větší než 300 Hz. Toho je třeba dosáhnout i při minimálních otáčkách spalovacího motoru, daných volnoběžným chodem. Je tím zajištěno, že během jízdy, kdy má trakční motor vyšší otáčky, budou střídavé složky proudu nad frekvencemi provozovaných kolejových obvodů.

Nevhodné ukolejnění

Problém při činnosti kolejových obvodů však nemusí představovat pouze přímý vliv frekvenčního rušení, negativně ovlivňovat jejich činnost může i nesprávně provedené ukolejnění. Jak bylo uvedeno v části týkající se ochranných opatření proti úrazu elektrickým proudem (Kapitola 2.4), na elektrifikovaných tratích je z důvodu ochrany před nebezpečným dotykovým napětím nutné v prostoru ohrožení trakčním vedením vodič spojit s kolejnicemi veškeré neživé části (buď přímo, nebo přes průrazku). Všechna tato připojení ke kolejnicím – ukolejnění – však mohou potenciálně způsobit poruchu fungování kolejových obvodů, a je jim proto potřeba věnovat náležitou pozornost.

V zásadě mohou nastat dva hlavní případy – o pasivním ovlivnění hovoříme v případě, kdy přímým připojením jedné kolejnice dvoupásového kolejového obvodu k zemnímu potenciálu dojde k přílišnému snížení impedance tohoto bodu vůči zemi a ke vzniku nesymetrie v obvodu. Zároveň toto spojení může přispět k vytvoření obchozí cesty s nedostatečným útlumem (tj. proudové cesty překlenující paralelně, vlivem nedostatečné impedance ukolejnění, určitou část kolejového obvodu). Tento stav je velice nebezpečný, protože obvod nemusí být schopen identifikovat lom kolejnice a v krajním případě může ztratit i schopnost detekce obsazeného úseku. Také proto je v [20] definována hodnota maximální měrné svodové admitance železničního svršku mezi kolejnicovými pásy (pro nové a rekonstruované tratě platí hodnota $y_{BS} < 0,33 \text{ S/km}$).

Druhým případem je ovlivnění aktivní, kdy nevhodným ukolejněním může dojít k přivedení cizích rušivých proudů do kolejových obvodů. Většinou lze předpokládat, že aktivní ovlivnění bude mít charakter síťového proudu (tj. 50 Hz včetně vyšších harmonických násobků), případně půjde o proud stejnosměrný. V praxi se tak většinou nejedná o zásadní ohrožení funkčnosti kolejových obvodů, pozornost je tak třeba věnovat zejména při ukolejňování nestandardních zařízení.

Vlivy okolních elektroenergetických systémů

Kromě popsaných galvanických vlivů jsou veškerá vedení kolejového obvodu (samotné kolejové vedení, vedení k napájecímu a přijímacímu konci kolejového obvodu atd.) vystavena indukčním vlivům elektromagnetických polí. Projevují se zejména vlivy všech s tratí více či méně souběžných elektroenergetických vedení, ale také elektromagnetická pole vznikající v blízkosti trakčních spotřebičů (zejména hnacích vozidel) a, při extrémní blízkosti a velkém výkonu, například i rádiové vysílače.

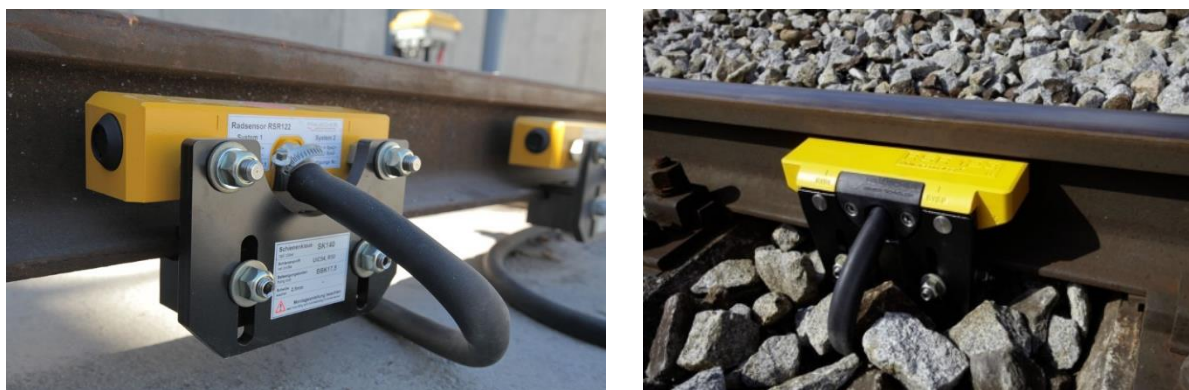
3.2.2 Počítače náprav

S technickým pokrokem v oblasti elektroniky se stále častěji využívají pro detekci vlaku v ohraničených traťových oblastech bodové prostředky, kdy na koncích kolejového úseku jsou umístěna čidla reagující na průjezd náprav železničních vozidel. Signály jsou zasílány do řídicí jednotky, která vyhodnocuje, zda je počet náprav do úseku vstupující shodný s počtem náprav z úseku vstupujícím. Tím se nepřímě zjišťuje, jestli je kontrolovaná část trati volná, či nikoli. Pro spolehlivou funkci jsou na nerozvětveném kolejovém úseku potřeba alespoň dva páry detektorů kol, jeden na každém konci kolejového úseku. Pár detektorů musí být umístěn proto, aby počítač náprav mohl správně vyhodnotit směr pohybu vlaku, a tak korektním způsobem nápravu přičítat nebo odečítat.

Počítače náprav v řadě případů odstraňují provozní potíže a nedostatky kolejových obvodů, a zejména na vedlejších tratích s nižšími rychlostmi je jejich použití mnohdy výhodnější. Mezi klady oproti kolejovým obvodům patří zvláště bezchybná činnost nezávislá na technickém stavu kolejového svršku, odpadají problémy při nedokonalém šuntování či s nevhodným ukolejňováním. Počítače náprav rovněž nevyžadují vytváření izolovaných úseků na trati.

Detektory počítačů náprav mohou být negativně ovlivňovány různými způsoby, např. magnetickými poli nebo kovovými částmi v okolí kol a podvozků, které jsou zároveň v blízkosti snímačů (vliv magnetických polí v rozsahu pracovní frekvence jednotlivých počítačů náprav je ale převládající). Zpravidla je však oproti kolejovým obvodům splnění požadavků na kompatibilitu jednodušší. [22]

Naopak jedním ze zásadních nedostatků je neschopnost detekce lomu kolejnice. Podstata fungování tohoto systému zároveň neumožňuje ani dodatečné kódování vlakového zabezpečovače a po výpadku napájení nebo při poruše je nutné pomocí zásahu lidského činitele ověřit, zda je kolejový úsek hlídáný pomocí počítače náprav volný, nebo obsazený.



Obr. 3.7: Příklad provedení počítače náprav od výrobce Frauscher GmbH. [47]

4 SUBSYSTÉM KOLEJOVÁ VOZIDLA

Subsystem nazvaný kolejová vozidla (RST) shrnuje požadavky na provedení, strukturu a systém řízení všech elektrických a mechanických částí trakčních i netrakčních vozidel, které mají vztah k interoperabilitě.

Jak již bylo zmíněno, vývoj elektrických železničních vozidel zaznamenal, společně s pokrokem zejména v oblasti polovodičové techniky, v nedávné minulosti poměrně progresivní rozvoj. Od stejnosměrných i střídavých komutátorových trakčních motorů se postupně, zejména kvůli podstatně vyšší odolnosti vůči provozním vlivům, lepším regulačním možnostem, vyšším výkonovým parametrům a nižším rozměrům i hmotnosti, přešlo k použití bezkomutátorových třífázových motorů, napájených z polovodičových měničů. Ty jsou dnes využívány téměř jednotně napříč celým oborem elektrické trakce a jiná vozidla již prakticky nejsou vyráběna.

Použitá trakční napěťová soustava (ať už střídavá či stejnosměrná) má proto na strukturu technického řešení elektrických vozidel pouze nepatrný vliv. V podstatě jde o jen o to, zda vozidla mají či nemají transformátor a čtyřkvadrantový vstupní měnič. Všechny ostatní části elektrické výzbroje a celá mechanická část vozidel je v podstatě u všech napěťových soustav totožná. Snad jediný podstatný rozdíl tak spočívá právě v komponentech přívodu proudu, kterým je věnována i tato práce.

Je to dáno jednak různými národními standardy, ale na druhé straně i důvody technickými. Dobrým příkladem může být sběrač proudu, kdy obvykle nelze použít tentýž pantograf (zejména u vlaků velkých výkonů a rychlostí) pro stejnosměrné a střídavé systémy. Jedním z důvodů často bývá předepsaný odlišný materiál sběracích ližin, případně odlišná šířka smykadla. Dále je však technickou překážkou i těžká hlavice sběrače, která je z důvodu značných dynamických sil na lehkých střídavých trakčních vedeních nepřipustná. Podobné konstrukční odlišnosti se týkají i dalších prvků rozvodu, jako vypínače, kabelová vedení i měřicí transformátory.

Pokud se dále zaměříme pouze na část elektrickou (která tvoří jen menší část subsystému „Kolejová vozidla“), zjistíme, že řada požadavků uvedených v TSI RST [24] je ve shodě, případně se přímo odkazuje na specifikace již uvedené v ostatních normách TSI, a tedy i předchozích kapitolách této práce. Bylo by proto pravděpodobně nadbytečné je na tomto místě uvádět znovu. Z uvedeného důvodu jsou případné dílčí požadavky na provedení, uvedené v TSI RST zohledněny a zmíněny přímo při samotném návrhu systémového řešení napájení v následujících kapitolách práce.

5 ELEKTRICKÁ JEDNOTKA PRO REGIONÁLNÍ DOPRAVU

V předchozích částech práce byly popsány a vysvětleny jednotlivé části železničního systému, zejména s důrazem na jejich vzájemné vazby a interakce. Nyní bude těchto poznatků využito při **návru koncepčního řešení zařízení vysokého napětí na vozidle**. To tvoří jednu z řady tzv. funkčních skupin, na které je možné vozidlo v rámci projektového členění rozdělit a jejichž závazné označení a definice je uvedena v ČSN EN 15 380-2.

Tab. 5.1: Dělení projektu na jednotlivé funkční skupiny, údaje převzaty z [23].

Hlavní funkční skupiny železničního vozidla			
B	Rám vozidla	L	Klimatizace
C	Základní vybavení interiéru	M	Přídavná provozní zař., pískování, mazání
D	Doplňkové vybavení interiéru	N	Dveře
E	Pojezd	P	Informační systém pro cestující
F	Napájecí obvody, pohon	Q	Pneumatická a hydraulická zařízení
G	Řídicí systémy vozidla	R	Brzdy
H	Pomocná provozní zařízení, baterie	S	Zařízení pro spojování vozidel (spřáhlo)
J	Monitoring a bezpečnostní zařízení	T	Systémy pro montáž rozvodu, rozváděče
K	Osvětlení	U	Kabeláž

Dále jsou funkční skupiny děleny na podskupiny, blíže specifikující okruh zařízení či komponent, kterých se problematika týká. Vzhledem k zaměření této práce je podstatná **funkční skupina F**, jejíž bližší rozdělení je uvedeno v Tabulce 5.2, podrobnější rozdělení i ostatních funkčních skupin lze nalézt v [23].

Tab. 5.2: Dělení funkční skupiny F (napájecí obvody, pohon) na podskupiny, údaje převzaty z [23].

Dělení funkční skupiny F		
F	A	Celková koncepce napájecího systému a pohonné jednotky
	B	Zařízení vysokého napětí pro přívod proudu
	C	Zařízení pro výrobu energie, spalovací jednotka
	D	Zařízení pro transformaci energie, měnič, trakční pohon
	E	Zařízení zpětné cesty proudu
	F	Zařízení pro ukládání energie, setrvačníky

Pro vzorový návrh byla zvolena dvousystémová regionální (příměstská) jednotka, určená pro provoz v sítích 3 kV DC a 25 kV; 50 Hz AC – tedy na obou u nás nejvíce používaných napájecích systémech. Obdobné jednotky různých výrobců jsou s úspěchem používány v řadě evropských zemí a zejména právě v příměstské regionální dopravě představují díky svému obousměrnému uspořádání, plně bezbariérovosti a dostatečnému trakčnímu výkonu (snaha o intenzivní brzdění, rychlou výměnu cestujících a intenzivní rozjezd) velmi žádaný a oblíbený produkt mezi železničními dopravci i cestujícími.

Příkladem takovéto ucelené třívozové jednotky je kupříkladu vlaková souprava Siemens Desiro ML na obrázku níže.



Obr. 5.1: Příklad moderní elektrické jednotky pro příměstskou regionální dopravu typu Desiro ML z produkce firmy Siemens. [48]

V dalším textu budou nejprve shrnuty technické parametry a navržena základní prostorová dispozice uvažované elektrické jednotky. Šestá kapitola se pak věnuje samotnému návrhu vysokonapěťových komponent a specifikům, které jejich použití na drážním vozidle přináší.

5.1 Technické parametry

V souladu se současnými trendy v železniční dopravě bude koncepční návrh uvažovat plně nízkopodlažní vozidlo s úrovní podlahy ve výšce 600 mm nad temenem kolejnice, umožňující bezbariérový nástup z nástupišť o standardizované výšce 550 mm. Plná bezbariérovost jednotky s sebou však přináší i některé technické výzvy, kdy například téměř veškeré komponenty silového rozvodu, a to včetně síťového transformátoru nebo čtyřkvadrantového

měníče, musí být kvůli nedostatku prostoru umístěny na střeše jednotky, a nikoli ve strojovně či pod vozidlem, jako je tomu kupříkladu u lokomotiv a souprav s výše položenou podlahou.

Jednotka je uvažována jako třívozová, s celkem čtyřmi hnanými podvozky (dva na každém z čelních vozů) a dvěma podvozky netrakovými na voze vloženém. Celkový trakční výkon je stanoven na 2 200 kW, maximální rychlost pak 160 km/h. Všechny uvažované parametry shrnuje následující tabulka.

Tab. 5.3: Technické parametry uvažované jednotky pro příměstskou regionální dopravu.

Technické parametry	
Trakční systém	25 kV; 50 Hz AC / 3 kV DC
Maximální trakční výkon	2 200 kW
Příkon vedlejší spotřeby	220 kW
Maximální tažná síla	170 kN
Maximální brzdná síla	140 kN
Uspořádání pojezdu	Bo´Bo´+2´2´+Bo´Bo´
Maximální provozní rychlost	160 km/h
Maximální zrychlení	1,1 m/s ²
Rozchod	1 435 mm
Délka vozidla (přes spřáhla)	79 907 mm
Výška podlahy	600 mm
Počet míst k sezení	280
Hmotnost prázdné/obsazené jednotky	147 / 191 t
Maximální nápravové zatížení	<17 t
Rozsah provozních teplot	-25 °C...+40 °C

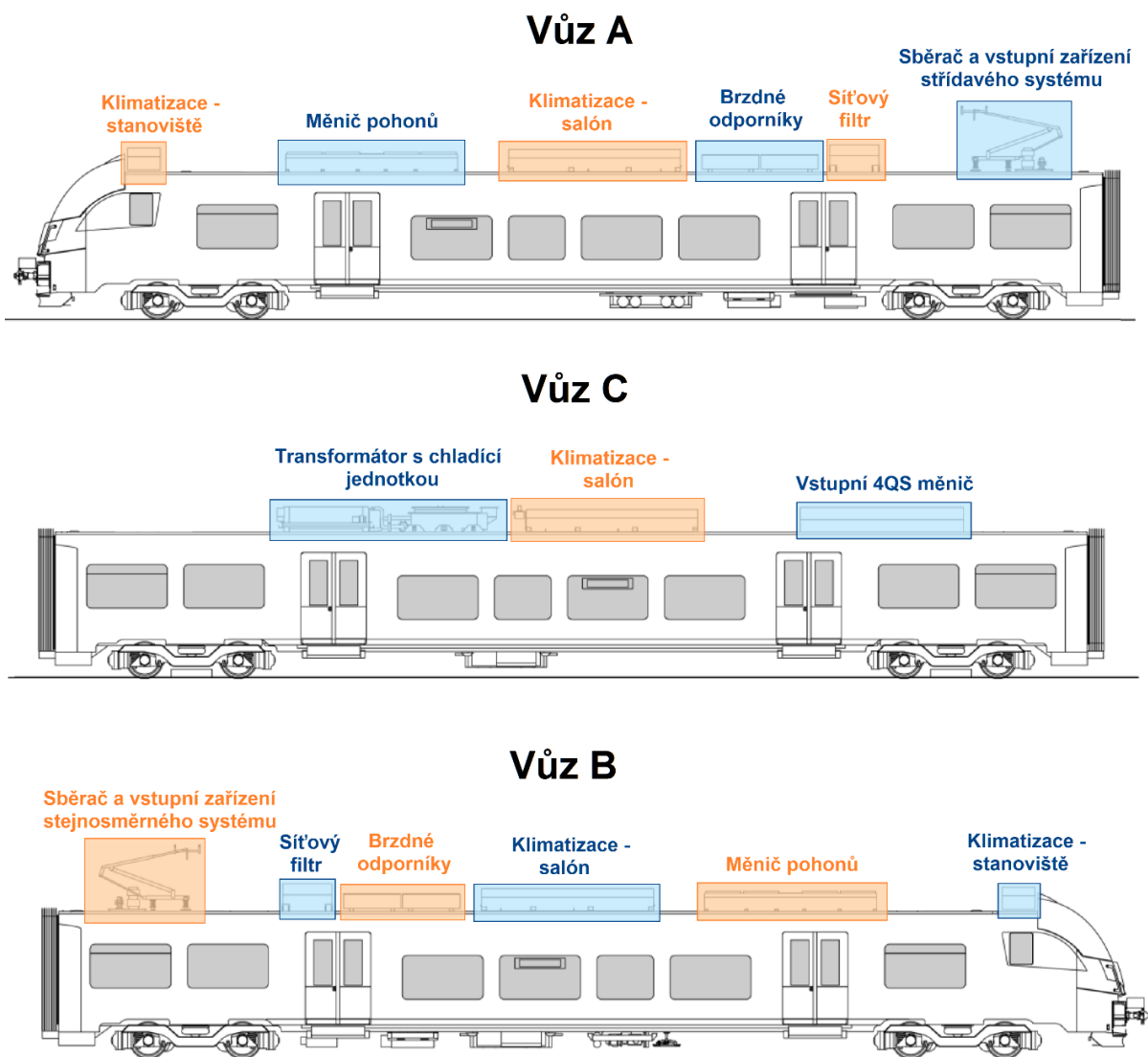
5.2 Prostorová dispozice

Výhodou ucelených jednotek, částečně kompenzující omezené prostorové možnosti v rámci vozidla, je možnost rozmístit vysokonapěťové komponenty mezi jednotlivé vozy tak, aby se docílilo lepšího využití střešního prostoru a zároveň se dosáhlo přibližně podobné váhy jednotlivých částí jednotky. Díky tomu nebude střecha v některých bodech zbytečně nadměrně mechanicky namáhána a umožní to také dosažení rovnoměrnějšího nápravového zatížení, které může být v některých případech limitním faktorem příslušné dopravní infrastruktury.

Přináší to s sebou však nutnost řešit vysokonapěťový rozvod v rámci jednotlivých vozů i v místech přechodu mezi nimi. Vše je přitom třeba uvažovat s důrazem na spolehlivost provozu i bezpečnost cestujících. Celkové prostorové uspořádání proto musí zaručit

nezbytnou izolační vzdálenost i dodržení minimálních vzdušných odstupů a nejkratších délek povrchových cest, bránících přeskočení vysokého napětí na okolní objekty. Současně je nutná i prostorová koordinace s dalšími zařízeními jako jsou klimatizační jednotky, chladicí jednotky pro transformátor a výkonové měniče atd.

Principiální pohled na jednotku, spolu s rozložením jednotlivých částí silnoproudého rozvodu, je znázorněn na následujícím obrázku.



Obr. 5.2: Prostorová dispozice a rozložení komponentů na střeše navrhované elektrické jednotky.

6 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ KOMPONENT PŘÍVODU PROUDU

Následující kapitola je věnována návrhu komponent přívodu proudu, jinými slovy zařízením vysokého napětí v silovém rozvodu od sběrače až k hlavnímu transformátoru u střídavých soustav, resp. po síťový filtr na stejnosměrné trakci. Dle konvence uvedené v normě ČSN EN 15 380-2 jde o následující komponenty:

- **Sběrač proudu**
- **Hlavní vypínač a zemnicí odpojovač**
- **Svodič přepětí**
- **Kabelová vedení *vn* a ostatní prvky rozvodu proudu**

Vzhledem k tomu, že se jedná o koncepční návrh napájení jednotky vícesystémové, je i následující text členěn do dvou samostatných částí – nejprve na návrh střídavé a posléze stejnosměrné trakce. Následně, na závěr kapitoly, je uveden souhrnný přehled celkového silového zapojení celé jednotky.

Na úvod kapitoly však zmiňme alespoň základní aspekty, které je nutné při výběru komponent pro střídavou a stejnosměrnou soustavu zvážit, a které dokazují nutnost značně rozdílného přístupu k oběma napájecím systémům.

Sběrač proudu

- **Střídavý systém** – vzhledem k vyššímu napětí, a tedy nižším protékajícím proudům, se používají méně mohutné sběrače se sběracími lištami z uhlíku, které jsou méně abrazivní vůči trolejovému vodiči. Spolu s přítomností vysokého napětí je třeba také dodržet větší přeskokové a povrchové vzdálenosti než u stejnosměrného systému.
- **Stejnoseměrný systém** – s ohledem na přibližně osmkrát nižší napěťovou hladinu je důležitá především dobrá vodivost sběrací lišty, proto je v tomto případě používána uhlíková lišta sycená mědí (obsah mědi je max. 40 % hmotnostního podílu). Negativem tohoto řešení je vyšší opotřebení trolejového vodiče. V žádném případě pak nelze z hlediska opotřebení doporučit kombinovaný provoz s různými typy sběračů na jedné napájecí síti (a to ani s tzv. univerzálním sběračem).

Hlavní vypínač

- **Střídavý systém** – vzhledem k příznivému poměru hmotnosti a rozměrů se s naprostou dominancí používají vakuové vypínače. Uvnitř komory jsou spínací kontakty, mezi kterými po rozpojení obvodu vzniká elektrický oblouk. Ke zhášení dochází při přirozeném průchodu proudu nulou, zároveň dojde i k rychlému elektrickému zotavení spínací komory a oblouk už se znovu neobnoví. Vypínací vlastnosti jsou do značné míry ovlivněny materiálem kontaktů a jejich speciálně upravenou konstrukcí (např. zářezy opatřené

kontakty s tangenciálním pohybem elektrického oblouku) – při vhodném uspořádání a geometrii je zhášení oblouku zesíleno, a tak minimalizováno opotřebení kontaktů. Hlavní vypínač vozidla musí být u střídavých soustav schopný vypínat veškeré poruchové proudy v síti. Činnost vypínače by měla být nastavena tak, aby nejprve zapůsobila automatická ochrana hnací jednotky, a tím se předešlo vypnutí vypínačů trakční napájecí stanice. Součástí vypínače je většinou i zemnicí odpojovač.

- **Stejnoseměrný systém** – na rozdíl od střídavých systémů se používají stejnosměrné, proud omezující rychlovypínače s přirozeným chlazením. Jedná se o jednopólové rychlovypínače s nezávislým vypínáním, vybavené elektromagnetickým vyfukováním oblouku a okamžitým přímým rozepnutím v případě nadproudu. Pro zvýšení napětí na oblouku nad síťové napětí tak, aby vypínací proud klesl k nule, se vytvořený oblouk ve zhášecí komoře rozdělí na celou řadu oblouků menších (anodový a katodový spád se zmnohonásobí) a zároveň dojde k jejich prodloužení magnetickými póly nebo termickým působením. Vypínač se dodává většinou již jako kompletní zařízení ve střešním kontejneru. Zemnicí odpojovač obvykle není součástí vypínače.

Svodič přepětí

- **Střídavý systém** – jako svodiče přepětí se používají varistory, tj. napěťově závislé odpory, vyrobené z oxidu kovu (např. oxid zinečnatý – ZnO), které mají extrémně nelineární volt-ampérovou charakteristiku, od určitého napětí se stávají vodivými a umožňují svést proud mimo chráněné zařízení. Svodič je složen ze sloupce disků, jejichž vrstvením do série se dosahuje požadovaného jmenovitého napětí, mohutnost (průměr a výška) disků pak určuje možnou mírou absorpce energie. Výhodou varistorových svodičů je velmi rychlá reakce na přepětí v řádu nanosekund.
- **Stejnoseměrný systém** – i u stejnosměrných systémů se používají varistorové svodiče přepětí, pouze patřičně dimenzované na odpovídající napěťovou hladinu.

Přístrojové transformátory proudu

- **Střídavý systém** – lze použít konstrukce s vloženým kabelem (mechanicky rozdělitelná, montáž okolo již položeného kabelu, vnitřní provedení) nebo s prostrčeným kabelem (mechanicky nedělitelná, montáž před pokládkou kabelů, použitelné i ve venkovním prostředí). V obou případech slouží jako primární vinutí vnitřní vedení kabelu, které indukuje proud ve vinutí sekundárním. Nejde tak o přístroje vysokého napětí v pravém slova smyslu – transformátory a kabely nemají žádné galvanické spojení.
- **Stejnoseměrný systém** – v případě stejnosměrných soustav nemohou pasivní měřicí transformátory pochopitelně přenášet žádné proudy ani napětí. Proto se používá elektronických přístrojů, využívajících převážně kompenzační princip. U přístrojových transformátorů proudu je využíván princip kompenzace

magnetického toku vytvářeného primárním proudem kabelu, pomocí toku opačného ve vinutí kolem magnetického obvodu. Každá odchylka od nulového vyvážení vede ke vzniku Hallova napětí. Elektronický obvod ihned dodá sekundární proud, potřebný ke kompenzaci magnetického pole. Tento proud dělený počtem závitů kolem magnetického obvodu představuje skutečný obraz primárního proudu. Nevýhodou tohoto řešení je nutné externí napájení, měřicí přístroje také nejsou příliš robustní a při venkovním použití se musí umístit do speciálních uzavřených boxů. Při návrhu je také nutné dbát na omezení možného vlivu cizích polí.

Přístrojové transformátory napětí

- **Střídavý systém** – pro účely drážních vozidel se obvykle používá venkovní provedení měřicího transformátoru s izolátorem z licí pryskyřice. Primární vinutí je jednostranně uzemněno, strana vysokého napětí se připojí na vrchní (venkovní) stranu transformátoru. Příruba transformátoru je utěsněna ke střeše vozidla a sekundární strana vinutí se následně připojí zevnitř vozu.
- **Stejnoseměrný systém** – u stejnosměrných systémů se stejně jako v případě přístrojových transformátorů proudu používají elektronické přístroje vyžadující externí napájení. Při venkovním použití se musí umístit do speciálních uzavřených boxů a je také nutné ve zvýšené míře dbát na omezení možného nežádoucího ovlivňování měřicího signálu.

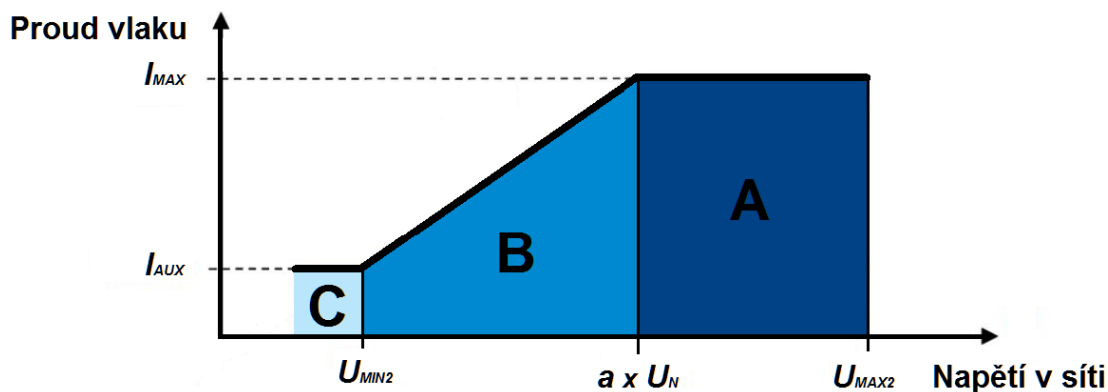
Kabelová vedení

- **Střídavý systém** – vzhledem vysokému napětí je nutné se u kabelů zabývat zvládnutím řízení vysokých intenzit elektrických polí. Kabely se provádějí výhradně jako stíněné a pro ukončování kabelů je nutné používat kabelové koncovky a speciální konektory vysokého napětí.
- **Stejnoseměrný systém** – pro dimenzování je rozhodující zpravidla vysoký protékající proud. Při napětí do 4 kV DC ještě není nutné řízení intenzity elektrického pole – kabely se většinou používají nestíněné a za předpokladu správného utěsnění je možné použít připojení pomocí konvenčních kabelových ok.

6.1 Návrh a dimenzování komponent střídavé části rozvodu

Následující část práce je zaměřena na návrh komponent střídavé části rozvodu. Pro jejich návrh a dimenzování je nejprve nutné stanovit některé výpočtové hodnoty, společně pro všechny části rozvodu. Jedním ze základních parametrů je **zatěžovací proud**, pro který budou prvky navrženy.

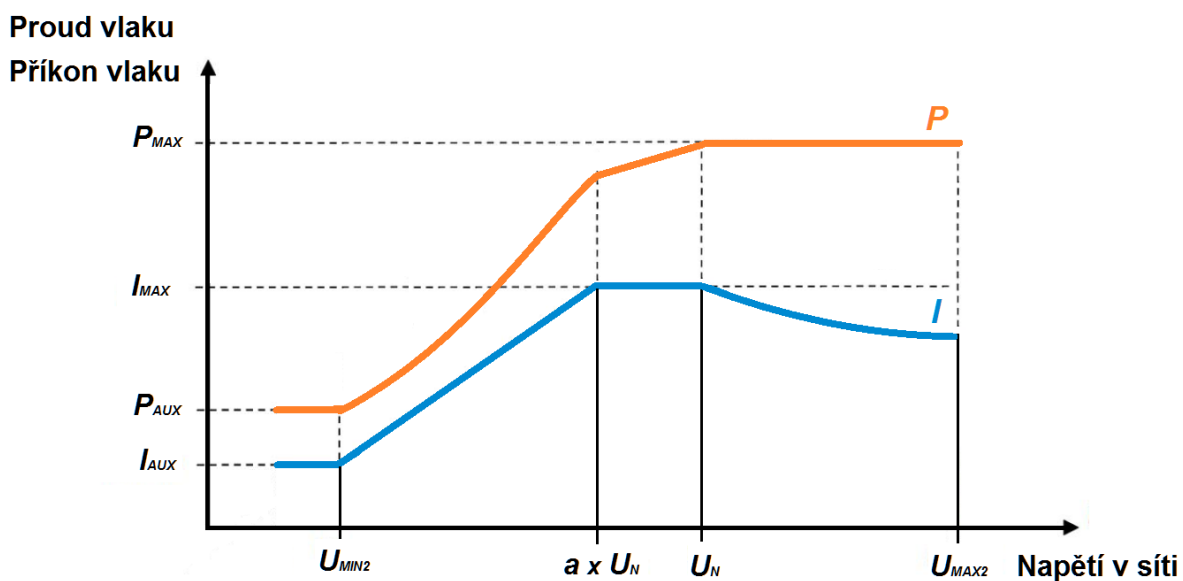
Odebíraný proud je kromě trakčního výkonu vlaku značně závislý také na napětí v síti. Každé vozidlo o výkonu vyšším než 2 MW musí být vybaveno voličem proudu nebo výkonu, který by omezoval maximální úroveň jedné z odebíraných veličin v závislosti na napětí v trakčním vedení. Příkladem může být naznačené omezení odběru trakčního proudu na Obr. 6.1, které vychází z normy ČSN EN 50 388.



Legenda	
A	Odběr trakčního proudu bez omezení
B	Oblast omezeného odběru trakčního proudu
C	Žádný odběr trakčního proudu, napájení pouze pomocných pohonů

Obr. 6.1: Omezení odběru trakčního proudu v závislosti na napětí v síti, podklad převzatý z [13].

V praxi se většinou tento požadavek na proudové (výkonové) omezení při poklesu napětí v síti realizuje tak, že maximálního příkonu je dosaženo při jmenovitém napětí v trakční síti (a při vyšším napětí je tato hodnota příkonu udržována konstantní – tj. odebíraný proud při růstu napětí zákonitě klesá). Naopak pokud je napětí v síti nižší než jmenovité, je do hodnoty součinu $a \times U_N$ (kde U_N je jmenovité napětí sítě a činitel a je stanoven v normě [13] – pro síť 25 kV; 50 Hz jde o hodnotu 0,9) stále odebírá plný výpočtový proud. Následně při dalším poklesu napětí je tento proud snižován v souladu s příkladem uvedeným na Obr. 6.1 až do stavu, kdy je při napětí U_{MIN2} odebírá pouze proud (resp. příkon) pro vedlejší spotřebu (pomocné pohony, vytápění, klimatizace).



Obr. 6.2: Znázornění skutečného provedení omezení odběru trakčního proudu a příkonu v závislosti na napětí v síti (ilustrativní obrázek).

Při výpočtu dále uvažujeme i nejméně příznivou hodnotu účinníku, kdy pro vlaky s výkonem 2 MW a vyšším platí nejnižší povolená hodnota účinníku $\cos\varphi \geq 0,95$. [13] Celkový vztah pro výpočtový (zatěžovací) proud má tedy následující tvar:

$$I_{C(AC)} = \frac{P_{C(AC)}}{U_{N(AC)} \cdot \cos\varphi_{\min}} \quad (6.1)$$

$$I_{C(AC)} = \frac{2808}{25 \cdot 0,95} \quad A = 118,2 \text{ A}$$

kde:	I_C	je zatěžovací (výpočtový) proud dané soustavy [A]
	P_C	je celkový příkon jednotky dle rovnice (6.2) [kW]
	U_N	je jmenovité napětí trakční soustavy [kV]
	$\cos\varphi_{\min}$	je nejnižší přípustná hodnota účinníku dle ČSN 50 388 [-]

Pro výpočet je rovněž potřebná znalost celkového příkonu vozidla, spočítaná dle 6.2:

$$P_{C(AC)} = \frac{P_T}{\eta_{C(AC)}} + P_{AUX} \quad (6.2)$$

$$P_{C(AC)} = \frac{2200}{0,85} + 220 \text{ kW} = 2808 \text{ kW}$$

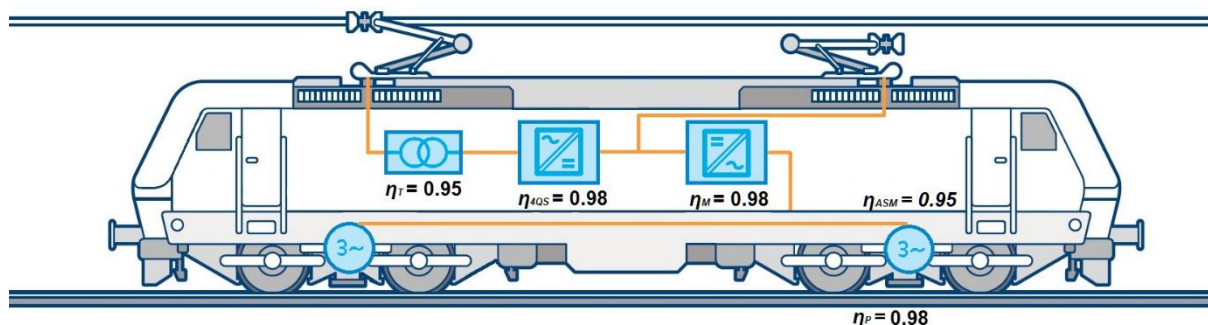
kde:	P_T	je celkový trakční výkon [kW]
	η_c	je souhrnná účinnost trakčních zařízení na vozidle dle rovnice (6.3) [-]
	P_{AUX}	je celkový příkon vedlejší spotřeby (netrakční pohony, topení, klimatizace) [kW]

Souhrnná účinnost zahrnuje veškeré ztráty v trakčních zařízeních a rozvodu na vozidle (viz schéma na Obr. 6.3). Lze ji určit jako součin dílčích účinností:

$$\eta_{C(AC)} = \prod_i \eta_i = \eta_T \cdot \eta_{4QS} \cdot \eta_M \cdot \eta_{ASM} \cdot \eta_P \quad (6.3)$$

$$\eta_{C(AC)} = 0,95 \cdot 0,98 \cdot 0,98 \cdot 0,95 \cdot 0,98 = 0,85$$

kde:	η_T	je účinnost trakčního transformátoru [-]
	η_{4QS}	je účinnost čtyř-kvadrantového měniče [-]
	η_M	je účinnost měniče trakčních pohonů [-]
	η_{ASM}	je účinnost asynchronního motoru [-]
	η_P	je účinnost převodovky v podvozku [-]



Obr. 6.3: Obvyklá účinnost jednotlivých komponent v silovém rozvodu vozidla.

6.1.1 Sběrač proudu AC

Sběrač proudu je vstupní komponentou vysokonapětového obvodu a tvoří zároveň rozhraní s napájecí infrastrukturou. Pro navrhovanou jednotku bude zvolen sběrač proudu v souladu s normou ČSN 50 206-1 [25] a na základě následujících kritérií:

- **Druh sběrače** – jednoramenný, pneumaticky ovládaný, vybaven tzv. zařízením pro samočinné stažení sběrače (*ADD – Automatic Dropping Device*), zajišťujícím v případě poškození sběracích ližin pantografu jeho automatické stažení (funkce je založena na principu vedení vnitřní drážky se stlačeným vzduchem každou z ližin – při poškození sběrače vzduch unikne, dojde k vyhodnocení ztráty tlaku a sběrač je stažen od trolejového vedení dolů).
- **Jmenovité napětí a frekvence** – sběrač je určen pro provoz v síti 25 kV; 50 Hz.
- **Jmenovitý proudový odběr, jízda** – výpočtový proud pro režim jízdy byl určen v předchozí části, jmenovitý proud musí být větší nebo roven této hodnotě.
- **Jmenovitý proudový odběr, stání** – tento parametr je důležitý zejména pro zabránění bodovému přehřívání smykadla pantografového sběrače, resp. trolejového vodiče, když vlak stojí a odebírá energii například pro pomocná zařízení. Minimální jmenovitou hodnotu určíme podle vztahu:

$$I_{Cs(AC)} = \frac{P_{AUX}}{U_{min2(AC)} \cdot \cos \varphi_{min}} = \frac{220}{17,5 \cdot 0,95} \text{ A} = 13,2 \text{ A} \quad (6.4)$$

kde: I_{Cs} je zatěžovací proud stojícího vlaku [A]
 U_{min2} je nejnižší dovolené krátkodobé napětí v síti [kV]

- **Jmenovitý krátkodobý nadproud** – jde o proud, který může přes sběrač procházet po stanovenou krátkou dobu za předepsaných podmínek a funkce. Sběrač je jištěn pouze výkonovým vypínačem v trakční napájecí stanici. Dle ČSN EN 50 388 by v síti 25 kV; 50 Hz měly být uvažovány maximální poruchové proudy o velikosti 15 kA.

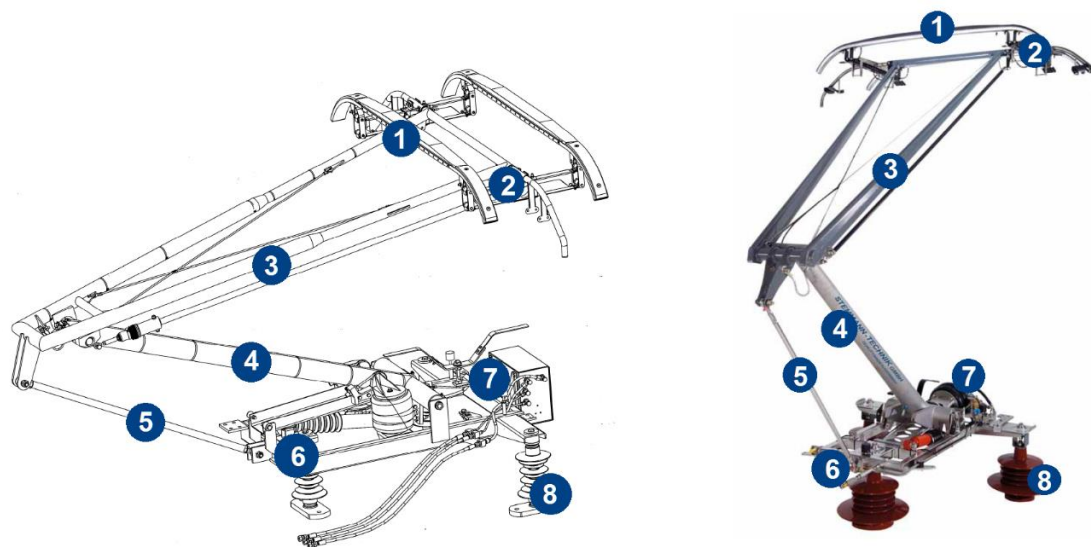
- **Maximální provozní rychlost** – navrhovaná maximální rychlost vlaku má vliv na konstrukci sběrače – u vlaků do středních rychlostí (cca 160 km/h) je mechanická konstrukce většinou z oceli a odpružení hlavy sběrače je jednodušší. Pro vyšší rychlosti jsou snímací lišty odpruženy jednotlivě, a alespoň vrchní rameno je zpravidla vyrobeno z hliníku. Tato rychlost musí být shodná nebo vyšší, než je maximální provozní rychlost vozidla, zde tedy 160 km/h.
- **Šířka sběrače** – šířka se liší podle uvažovaného státu, ve kterém bude vozidlo provozováno, v České republice je používán sběrač o šířce 1 950 mm.
- **Materiál sběrací lišty** – na střídavých soustavách se používají v našich podmínkách grafitové lišty.

Mezi nejvýznamnější výrobce sběračů proudu, alespoň v evropském kontextu, patří: *Austbreck, Faiveley Transport, Melecs, Schunk Group* nebo německý výrobce *Stemmann Technik*. [6]

Požadovaným parametrům na základě analýzy katalogových listů vyhoví například sběrač výrobce *Stemmann Technik*, typ DSA 150AC – technickou specifikaci zvoleného sběrače shrnuje následující tabulka.

Tab. 6.1: Technické parametry uvažovaného sběrače pro střídavý systém. [49]

Technické parametry	
Výrobce, typ	Stemmann Technik, DSA 150AC
Jmenovité napětí a frekvence	25 kV; 50 Hz
Jmenovitý proudový odběr, jízda	120 A
Jmenovitý proudový odběr, stání	15 A
Jmenovitý krátkodobý nadproud	25 kA / 1 s
Maximální provozní rychlost	160 km/h
Minimální pracovní výška	300 mm
Maximální pracovní výška	2 400 mm
Doba spouštění z max. výšky	4–6 s
Doba zdvihu do max. výšky	5–7 s
Šířka sběrače	1 950 mm
Materiál sběrací lišty	grafit
Statická přítlačná síla	nastavitelná v rozmezí 60–90 N
Hmotnost	cca. 125 kg
Rozsah provozních teplot	-35 °C ... +70 °C



- | | |
|------------------|---------------------|
| 1 Lišta smykadla | 5 Spojková tyč |
| 2 Smykadlo | 6 Základní rám |
| 3 Horní rameno | 7 Měchový pohon |
| 4 Spodní rameno | 8 Podpěrný izolátor |

Obr. 6.4: Sběrač střídavého systému od výrobce Stemmann Technik, upraveno. [49]

6.1.2 Hlavní vypínač a zemnicí odpojovač AC

Hlavní vypínač slouží k provoznímu odpojení rozvodů na vozidle od napájecí sítě, zároveň zajišťuje nadproudovou a zkratovou ochranu rozvodu. U střídavých soustav obvykle bývá spojena funkce hlavního vypínače a zemnicího odpojovače – ten je zpravidla ovládán manuálně z vnitřku vozidla a zemní oba póly vypínače. Pro navrhovanou jednotku bude zvolen hlavní vypínač v souladu s normou ČSN EN 60 077-4 [26] a na základě následujících kritérií:

- **Druh vypínače** – vakuový s vertikální nebo horizontální vypínací komorou a silikonovými izolátory.
- **Jmenovité napětí a frekvence** – vypínač je určen pro provoz v síti 25 kV; 50 Hz.
- **Maximální napětí** – hodnota maximálního napětí musí být vyšší, než je velikost nejvyššího krátkodobého napětí v síti, tj. 29 kV.
- **Jmenovitý (teplený) proud** – výrobcí je zpravidla uváděn tzv. *Conventional thermal current* I_{th} , tedy veličina, která udává hodnotu procházejícího proudu, při které nedojde při předpokládaném pracovním cyklu k oteplení kontaktů, ani jiné

části vypínače nad dovolenou teplotní mez. Tato hodnota musí být bezpečně vyšší, než je hodnota získaného výpočtového proudu v rovnici (6.1).

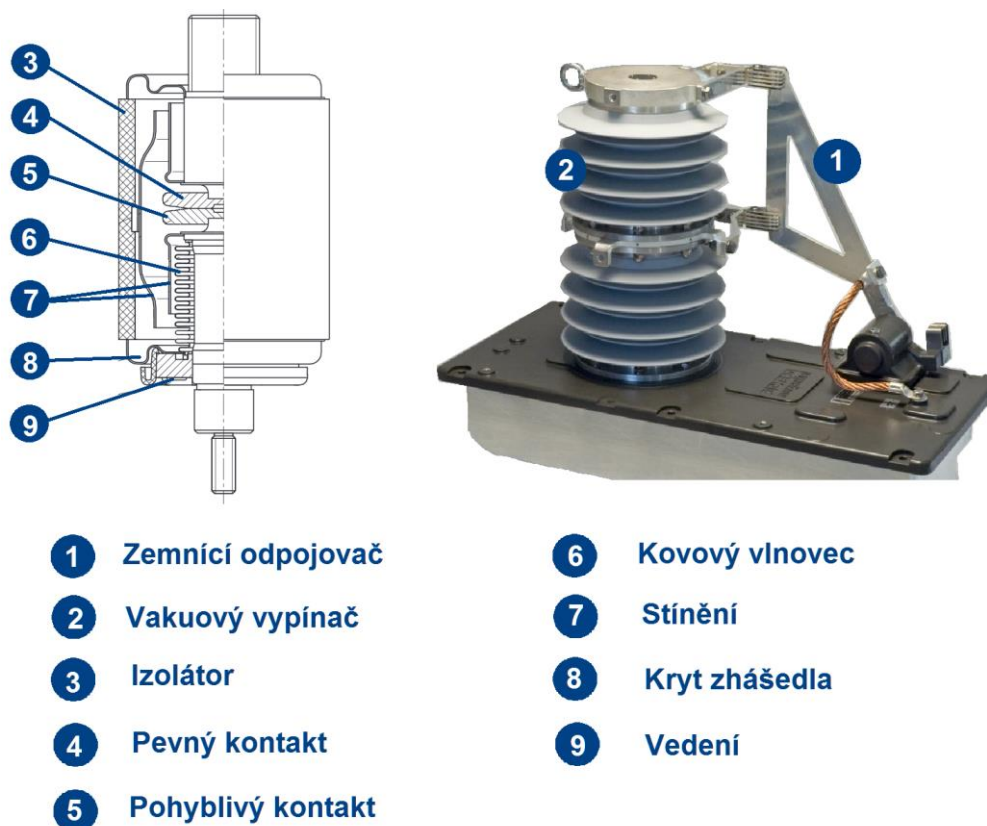
- **Jmenovitý vypínací proud** – hlavní vypínač vozidla musí být u střídavých soustav schopný vypínat veškeré poruchové proudy v síti. Hodnoty poruchových proudů, které by měly být uvažovány, jsou uvedeny v normě ČSN EN 50 388 a také v Tabulce 2.2 – pro soustavu 25 kV; 50 Hz by měl být minimální jmenovitý vypínací proud alespoň 15 kA.
- **Vypínací doba** – jde o čas, za jaký dojde k vypnutí vypínače. Doporučená maximální hodnota dle ČSN EN 50 388 je 100 ms. [13]

Existuje pouze poměrně málo výrobců, specializujících se na vypínače pro železniční vozidla, mezi nejvýznamnější z nich, alespoň v evropském kontextu, patří: *ABB*, *RICHARD Murgenthal*, *Schaltbau* nebo *Sécheron*. [6]

Požadovaným parametrům na základě analýzy katalogových listů vyhoví například vakuový vypínač švýcarského výrobce *RICHARD Murgenthal*, typ RM 531 – technickou specifikaci zvoleného vypínače shrnuje následující tabulka.

Tab. 6.2: Technické parametry uvažovaného hlavního vypínače pro střídavý systém. [50]

Technické parametry	
Výrobce, typ	RICHARD Murgenthal, RM 531
Druh vypínače	vakuový, vertikální vypínací komora
Jmenovité napětí a frekvence	25 kV; 50 Hz
Maximální napětí	30 kV
Jmenovitý proud	1000 A
Jmenovitý vypínací proud	25 kA
Jmenovitý krátkodobý nadproud	40 kA / 100 ms
Jmenovitý dynamický proud	63 kA
Vypínací doba	<60 ms
Zapínací doba	<60 ms
Garantovaný počet sepnutí	250 000
Hmotnost	cca. 115 kg
Rozsah provozních teplot	-35 °C ... +70 °C



Obr. 6.5: Hlavní vypínač s uzemňovacím odpojovačem od výrobce *RICHARD Murgenthal*, upraveno. [50]

6.1.3 Svodič přepětí AC

Svodič přepětí je umístěn ihned za proudovým sběračem a chrání vozidlo a za ním umístěné prvky rozvodu před účinky přepětí z napájecí sítě (ať už spínacího či atmosférického charakteru). Je však nutné si uvědomit, že svodič nedokáže zařízení ochránit před přímým zásahem blesku, aniž by se před tím uplatnil omezující účinek přeskoků na venkovních izolátorech. S vysokou pravděpodobností v těchto případech přímého zásahu blesku dochází k poškození svodiče i chráněného zařízení. Tyto situace však v praxi nastávají zcela výjimečně.

U střídavých soustav se kromě svodiče před hlavním vypínačem umísťuje i druhý svodič přepětí za vypínač, respektive před primární vinutí transformátoru. Jeho účelem je ochrana rozvodu před spínacím přepětím po vypnutí hlavního vypínače vozidla, k jehož vzniku dochází vlivem indukčnosti v obvodu (viz známý problém vypínání malých induktivních proudů – např. transformátor naprázdno). Pro navrhovanou jednotku bude zvolen svodič přepětí v souladu s normou ČSN EN 60 099-4 [27] a na základě následujících kritérií:

- **Jmenovité napětí a frekvence sítě** – svodič je určen pro provoz v síti 25 kV; 50 Hz.
- **Trvalé provozní napětí** – je to nejvyšší efektivní hodnota napětí síťové frekvence, která může být trvale připojena na svorky omezovače. Tato hodnota musí být vyšší, než je maximální trvalé napětí v napájecí soustavě, tj. 27,5 kV.

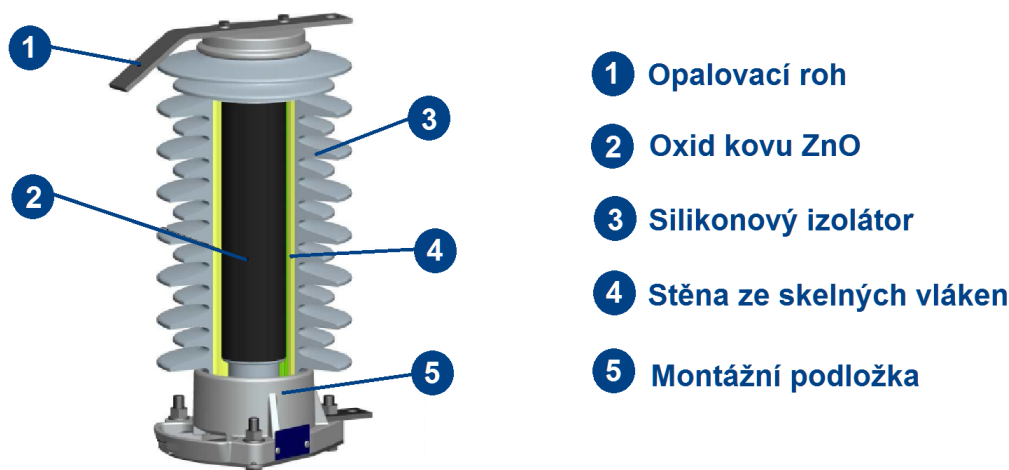
- **Jmenovité napětí** – nejvyšší efektivní hodnota napětí síťové frekvence, pro kterou je omezovač konstruován, aby působil správně v podmínkách dočasných přepětí. Toto napětí může být na omezovači připojeno pouze po stanovenou dobu.
- **Jmenovitý vybíjecí proud a zbytkové napětí** – jde o jmenovitou hodnotu bleskového proudu, pro kterou je svodič navržen. Tomuto proudu odpovídá zbytkové svorkové napětí na svodiči při zkoušce definovaným proudovým impulzem. Tato hodnota by dle ČSN EN 50 124-1 měla být alespoň 125 kV.

Svodiče přepětí speciálně určené pro použití na železničních vozidlech dodávají například výrobci: *ABB, Microelettrica Scientifica, Siemens, Tridelta* nebo *Tyco Electronics*. [6]

Požadovaným parametrům na základě analýzy katalogových listů vyhoví například svodič přepětí výrobce *Siemens*, typ 3EB4 370 – technickou specifikaci zvoleného svodiče shrnuje následující tabulka.

Tab. 6.3: Technické parametry uvažovaného svodiče přepětí pro střídavý systém. [51]

Technické parametry	
Výrobce, typ	Siemens, 3EB4 370
Druh svodiče	napětově závislý (varistor ZnO)
Jmenovité napětí a frekvence sítě	25 kV; 50 Hz
Trvalé provozní napětí	30 kV
Jmenovité napětí	37 kV
Jmenovité výdržné napětí při atmosférickém přepětí (1,2/50 μs)	170 kV
Jmenovitý vybíjecí proud	10 kA
Zbytkové napětí při zkoušce impulsem proudu (8/20μs)	100 kV
Rozsah provozních teplot	-40 °C ... +40 °C



Obr. 6.6: Svodič přepětí od výrobce *Siemens*, upraveno. [51]

6.1.4 Měřicí transformátor proudu a napětí AC

Měřicí transformátor napětí je na vozidle umístěn zpravidla mezi proudovým sběračem a hlavním vypínačem. Jeho úkolem je měřit napětí v trakční síti a tuto informaci předávat dále řídicím systémům vozidla pro účely ochrany před přepětím i podpětím v napájecí síti. Zároveň je informace o velikosti napětí potřebná i pro správnou synchronizaci sítě v měničích, a tedy regulaci na jednotkový účinník. V neposlední řadě se hodnota napětí používá jako vstupní signál pro měření spotřebované energie – elektroměr.

Pro navrhovanou jednotku bude zvolen měřicí transformátor napětí v souladu s normou ČSN EN 61 869-3 [28] a na základě následujících kritérií:

- **Druh měřicího přístroje** – venkovní provedení, sekundární strana vinutí připojena zevnitř vozu a na výstupu jištěna proti zkratu a přetížení.
- **Jmenovité napětí primárního vinutí** – primární vinutí má jmenovité napětí shodné s napětím napájecí sítě, v tomto případě je měřicí transformátor určen pro provoz v síti 25 kV; 50 Hz.
- **Jmenovité napětí sekundárního vinutí** – pro drážní účely se používá sekundární vinutí se jmenovitou hodnotou napětí 100 V. Napětí je tedy dostatečně nízké, aby mohlo být rozvedeno měřicím vedením, ale zároveň dost vysoké, aby nedošlo k jeho ovlivnění elektromagnetickými vlivy. Transformátory mají většinou alespoň dvě sekundární vinutí – první s vyšší přesností pro cejchované měření elektrické energie a následující méně přesná pro ostatní účely.
- **Třída přesnosti** – pro měřicí transformátory napětí je třída přesnosti určena nejvyšší dovolenou chybou měřené hodnoty při jmenovitém napětí, předepsanou pro příslušnou třídu přesnosti. Pro účely měření spotřeby energie se používá třída přesnosti 0,5 (max. 0,5 % chyba měření při jmenovitém napětí), pro ostatní účely pak obvykle třída přesnosti 1.

Měřicí transformátor proudu je umístěn u každého hlavního vypínače a primárně slouží k měření okamžité hodnoty proudu a vyhodnocování případných poruch. Zároveň je však proudový signál napájecí sítě potřebný i pro trakční měniče, které musí kvůli zachování kompatibility vyregulovat proudy určitých kmitočtů. Dále se hodnota protékajícího proudu používá jako vstupní signál pro měření spotřebované energie.

Pro navrhovanou jednotku bude zvolen měřicí transformátor proudu v souladu s normou ČSN EN 61 869-2 [29] a na základě následujících kritérií:

- **Druh měřicího přístroje** – použije se venkovní provedení s prostrčeným kabelem. Sekundární strana nesmí být rozpojena ani jištěna – transformátor se chová jako zdroj proudu a při rozpojení by došlo ke vzniku přepětí a zničení přístroje.
- **Jmenovitý proud primárního vinutí** – primární vinutí má jmenovitý proud blízký proudu výpočtovému (zatěžovacímu), viz rovnice (6.1).
- **Jmenovitý proud sekundárního vinutí** – sekundární vinutí transformátorů pro drážní účely má obvykle jmenovitou hodnotu proudu 1 A. Proud je tedy dostatečně nízký, aby mohl být rozveden měřicím vedením, ale zároveň dost vysoký, aby nedošlo k jeho ovlivnění elektromagnetickými vlivy.
- **Třída přesnosti** – definice i použití je ekvivalentní k přístrojovým transformátorům napětí.

Měřicí přístrojové transformátory speciálně určené pro použití na železničních vozidlech dodávají například výrobci: *ABB*, *RITZ Instrument Transformers*, *RS ISOLSEC* nebo *ZEZ Silko*. [6]

Požadovaným parametrům na základě analýzy katalogových listů vyhoví například měřicí transformátory napětí *GSEFB 25* a proudu *GFOFB 1910* od německého výrobce *RITZ* – technickou specifikaci zvolených přístrojů shrnuje následující tabulka.

Tab. 6.4: Technické parametry uvažovaného měřicího transformátoru napětí. [52]

Technické parametry	
Výrobce, typ	RITZ, GSEFB 25
Druh	venkovní provedení se dvěma sekundárními vinutími
Jmenovité napětí, primární strana	25 000 V
Jmenovité napětí, sekundární strana	100 V
Třída přesnosti	0.5 / 1
Jmenovitá zátěž	10 VA

Tab. 6.5: Technické parametry uvažovaného měřicího transformátoru proudu. [52]

Technické parametry	
Výrobce, typ	RITZ, GSOFB 1910
Druh	venkovní provedení s prostrčeným kabelem
Jmenovitý proud, primární strana	150 A
Jmenovitý proud, sekundární strana	1 A
Třída přesnosti	0.5
Jmenovitá zátěž	10 VA



Obr. 6.7: Měřicí transformátor napětí (vlevo) a měřicí transformátor proudu (vpravo), upraveno. [52]

6.1.5 Návrh součástek na rozvod proudu AC

Součástkami na rozvod proudu jsou obvykle v kontextu vysokonapěťového rozvodu železničního vozidla myšleny následující komponenty:

- Kabelové trasy
- Odpojovače střešního vedení
- Kabelové průchodky, koncovky, konektory
- Ostatní prvky rozvodu, úchyty, podpůrné izolátory, mezivozové přechody

Zásadní pro jejich spolehlivou funkci je správné dimenzování, kterému bude věnován i následující text.

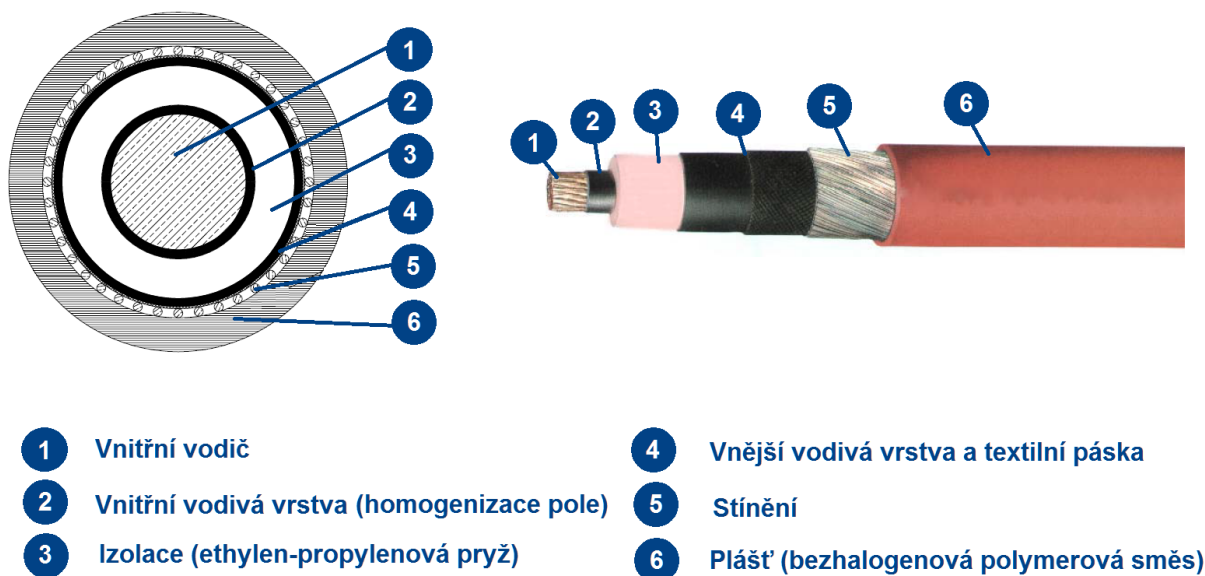
Kabelové trasy i ostatní součástky pro rozvod střídavého proudu zajišťují propojení jednotlivých vysokonapěťových komponent v rámci vozidla od pantografového sběrače až po hlavní transformátor. Vysoké napětí je (zejména z důvodů na straně bezpečnosti) vedeno prioritně po střeše vozidla a nikoli uvnitř vozidlové skříně (v prostoru pro cestující).

V mechanicky více namáhaných (tj. například pohyblivých) částech rozvodu nebo tam, kde by bylo prostorově obtížné umístit kabelové koncovky (propojení dvou přímo sousedících komponent), se obvykle volí měděné neizolované slané vodiče. Pro izolované části rozvodu se pak používají jednožilové bezhalogenové kabely, které v případě požáru zaručí omezené šíření plamene, vznik toxických plynů a kouře.

Nutným předpokladem pro výběr vhodného kabelu je jeho certifikace výrobcem pro použití na drážních vozidlech. Pro navrhovanou elektrickou jednotku byl vybrán kabel *TENAX-TRAIN-Plus* od výrobce *Draka*, jeho parametry shrnuje Tabulka 6.6.

Tab. 6.6: Technické parametry uvažovaného kabelu pro rozvod střídavého proudu. [53]

Technické parametry	
Výrobce, typ	Draka, TENAX-TRAIN-Plus
Druh kabelu	(N)EMCWOEU (stíněný kabel s měděným jádrem a izolací z ethylen-propylenové pryže)
Průřez jádra	50 mm ²
Odpor jádra kabelu (pro T = 20 °C)	0,393 Ω/km
Indukčnost kabelu (pro T = 20 °C)	0,45 mH/km
Maximální proudové zatížení kabelu při T _{okolí} = 30 °C	300 A
Jmenovité napětí (fázové/sdružené)	26/45 kV
Maximální provozní napětí	31/54 kV
Výdržné impulzní napětí	250 kV
Jmenovité výdržné napětí při atmosférickém přepětí (1,2/50 μs)	250 kV
Maximální dovolená provozní teplota jádra kabelu	+90 °C
Maximální dovolená teplota jádra kabelu při zkratu	+200 °C
Rozsah provozních teplot	-25 °C ... +80 °C



Obr. 6.8: Silový kabel TENAX-TRAIN-Plus od výrobce Draka, upraveno. [53]

U vyhovujícího typu kabelu (tj. rodiny kabelu) je dále nutné ověřit na základě kritérií popsaných v normě ČSN EN 50 343 **průřez jeho jádra**. Kontroluje se zejména [30]:

- Dimenzování na základě zatěžovacího proudu
- Dimenzování na základě zkratového proudu (maximální dovolené oteplení kabelu)
- Dimenzování na základě úbytku napětí
- Dimenzování na základě mechanických a provozních vlastností a podmínek

Velikost jádra kabelu je v první řadě určena jednak zatěžovacím proudem a dále také velikostí a dobou trvání proudu zkratového. V některých případech může být nutné průřez zvýšit i z důvodu nadměrných úbytků napětí nebo nedostatečné mechanické pevnosti – tyto případy se však týkají spíše kabelů o menších průřezech.

Dimenzování na základě zatěžovacího proudu

Nejprve je třeba přepočítat maximální proudové zatížení uvedené výrobcem v katalogovém listu kabelu tak, aby zohledňovalo skutečné uložení kabelu, teplotu okolí i předpokládanou životnost kabelu [30]:

$$I_{corr(AC)} = I_{cable(AC)} \cdot k_{1(AC)} \cdot k_{2(AC)} \cdot k_{3(AC)} \cdot k_{4(AC)} \cdot k_{5(AC)} \quad (6.5)$$

$$I_{corr(AC)} = 300 \cdot 0,913 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \text{ A} = 273,9 \text{ A}$$

kde: I_{corr} je korigované maximální proudové zatížení kabelu [A]
 I_{cable} je maximální proudové zatížení kabelu udané výrobcem pro definovanou teplotu okolí [A]

k_1	je korekční faktor pro předpokládanou teplotu okolí, spočítaný dle rovnice (6.6) [–]
k_2	je korekční faktor pro způsob instalace, pro uložení samostatného kabelu na příčkové podpěře (způsob uložení <i>b</i>) je faktor $k_2 = 1$ [–]
k_3	je korekční faktor předpokládané životnosti kabelu, pro standardní dobu životnosti je faktor $k_3 = 1$ [–]
k_4	je korekční faktor, který zohledňuje případný krátkodobý provoz, pro trvalý provoz je faktor $k_4 = 1$ [–]
k_5	je korekční faktor, zohledňující počet žil v kabelu, pro jednožilové vodiče je faktor $k_5 = 1$ [–]

$$k_{1(AC)} = \sqrt{\frac{T_{c(max)} - T_{o(max)}}{T_{c(max)} - T_{ref}}} \quad (6.6)$$

$$k_{1(AC)} = \sqrt{\frac{90 - 40}{90 - 30}} = 0,913$$

kde:	$T_{c(max)}$	je maximální teplota jádra, jejíž dodržení umožňuje dosažení předpokládané životnosti kabelu [°C]
	$T_{o(max)}$	je maximální předpokládaná teplota okolí, pro kterou je provoz vlaku navržen [°C]
	T_{ref}	je referenční teplota okolí, pro kterou platí hodnota I_{cable} [°C]

Musí platit, že korigovaná proudová zatížitelnost kabelu je vyšší než vypočtený zatěžovací proud:

$$I_{C(AC)} \leq I_{corr(AC)} \quad (6.7)$$

$$118,2A \leq 273,9A$$

Z rovnice (6.7) je patrné, že podmínka je s dostatečnou rezervou splněna, z pohledu trvalé proudové zatížitelnosti lze vodič pro dané charakteristiky provozu použít.

Dimenzování na základě zkratového proudu

Výběr průřezu jakéhokoli vodiče však nesmí být založen pouze na jeho trvalé proudové zatížitelnosti, ale musí se přihlížet i k dalším hlediskům, jako je již zmíněné oteplení při průchodu zkratového proudu.

Maximální efektivní hodnota zkratového proudu, se kterou se má ve výpočtu počítat, je stanovena v ČSN EN 50 388 a pro síť 25 kV; 50 Hz jde o hodnotu 15 kA. Druhým důležitým parametrem je doba průchodu tohoto zkratového proudu – opět vyjdeme z hodnot doporučených pro výpočet v normě ČSN EN 50 388, kdy vypínací časy hlavního vypínače na vozidle i vypínače v napájecí stanici se obvykle v případě proudů maximálních nebo jim blízkých pohybují od 50 do 100 ms. [13] Údaj uvedený v katalogovém listu výrobce hlavního vypínače, tj. doba vypnutí menší než 60 ms, tomuto předpokladu odpovídá. [50]

Pro minimální průřez vodiče pak musí platit [31]:

$$S_{\min(AC)} = \frac{\sqrt{I_{ke(AC)}^2 \cdot t_k}}{k_{(AC)}} \quad (6.8)$$

$$S_{\min(AC)} = \frac{\sqrt{(15 \cdot 10^3)^2 \cdot 0,1}}{122,1} = 38,85 \text{ mm}^2$$

kde:	S_{\min}	je minimální vyhovující průřez kabelu [mm ²]
	I_{ke}	je efektivní hodnota předpokládaného poruchového proudu [A]
	t_k	je doba průchodu zkratového proudu [s]
	k	je korekční faktor závisející na materiálových vlastnostech kabelu a počátečních a koncových teplotách, spočítaný dle rovnice (6.9) [A·s ^{0,5} ·mm ⁻²]

Norma [31] hodnoty potřebné pro výpočet v rovnici (6.9) přímo zadává. Konečnou a počáteční teplotu vodiče odečteme z katalogu výrobce (viz parametry kabelu v Tab. 6.6).

$$k_{(AC)} = \sqrt{\frac{c_v (\beta + 20)}{\rho_{20}} \cdot \ln\left(\frac{\beta + \vartheta_k}{\beta + \vartheta_1}\right)} \quad (6.9)$$

$$k_{(AC)} = \sqrt{\frac{(3,45 \cdot 10^{-3}) \cdot (234,5 + 20)}{17,241 \cdot 10^{-6}} \cdot \ln\left(\frac{234,5 + 200}{234,5 + 90}\right)} = 122,1 \text{ A} \cdot \text{s}^{0,5} \cdot \text{mm}^{-2}$$

kde:	c_v	je objemová tepelná kapacita materiálu [J·°C ⁻¹ ·mm ⁻³]
	β	je reciproká hodnota teplotního součinitele rezistivity pro vodič daného materiálu při 0 °C [°C]
	ρ_{20}	je elektrická rezistivita materiálu vodiče při 20 °C [Ω·mm]
	ϑ_1	je počáteční teplota vodiče [°C]
	ϑ_k	je konečná teplota vodiče [°C]

Analogicky k maximální proudové zatížitelnosti musí platit, že spočtený minimální průřez jádra kabelu je vyšší než průřez navržený:

$$S_{\min(AC)} \leq S_{\text{cable}(AC)} \quad (6.10)$$

$$38,85 \text{ mm}^2 \leq 50 \text{ mm}^2$$

Z nerovnosti (6.10) opět vidíme, že průřez i v tomto kritériu vyhoví.

Dimenzování na základě úbytku napětí

Dále je možné kontrolovat kabel na úbytek napětí, ten lze vypočítat dle následujícího vztahu:

$$\Delta U_f = Z \cdot \hat{I} = (R + jX) \cdot (I_c \pm jI_j) \quad (6.11)$$

Po úpravě a při uvažování převažující induktivní zátěže (znaménko mínus v rovnici (6.11)), dostáváme:

$$\Delta U_f = (RI_c + XI_j) + j(XI_c - jRI_j) \quad (6.12)$$

kde:	ΔU_f	je napět'ový úbytek na kabelu [V]
	R	je odpor kabelu [Ω]
	X	je reaktance kabelu [Ω]
	I_c	je činná složka proudu [A]
	I_j	je jalová složka proudu [A]

První člen v rovnici (6.12) vyjadřuje velikost úbytku napětí, imaginární část pak jeho fázi. Pro napět'ovou hladinu vn a odběr s účíníkem blízkým jedné je možné imaginární část s dostatečnou přesností zanedbat. Proto lze psát:

$$\Delta U_f = RI_c + X_L I_j = R_k \cdot l \cdot I_{C(AC)} \cdot \cos \varphi + 2\pi f \cdot L_k \cdot l \cdot I_{C(AC)} \cdot \sin \varphi \quad (6.13)$$

$$\Delta U_f = 0,5 \cdot 0,05 \cdot 118,2 \cdot 0,95 + 2\pi \cdot 50 \cdot (0,45 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,05 \cdot 118,2 \cdot 0,31 = 3,1 \text{ V}$$

kde:	R_k	je měrný odpor kabelu přepočtený na nejvyšší provozní teplotu podle rovnice (6.14) [$\Omega \cdot \text{km}^{-1}$]
	l	je uvažovaná délka kabelu [km]
	f	je síťová frekvence [Hz]
	L_k	je měrná indukčnost kabelu [$\text{H} \cdot \text{km}^{-1}$]

$$R_{g1} = R_{g2} [1 + \alpha_{Cu} (\vartheta_1 - \vartheta_2)] \quad (6.14)$$

$$R_k = R_{g0} = 0,392 \cdot [1 + 3,93 \cdot 10^{-3} \cdot (90 - 20)] = 0,50 \, \Omega \cdot km^{-1}$$

kde:	R_g	je měrný odpor pro danou teplotu [$\Omega \cdot km^{-1}$]
	α_{Cu}	je teplotní součinitel mědi [K^{-1}]
	ϑ	je příslušná teplota [$^{\circ}C$]

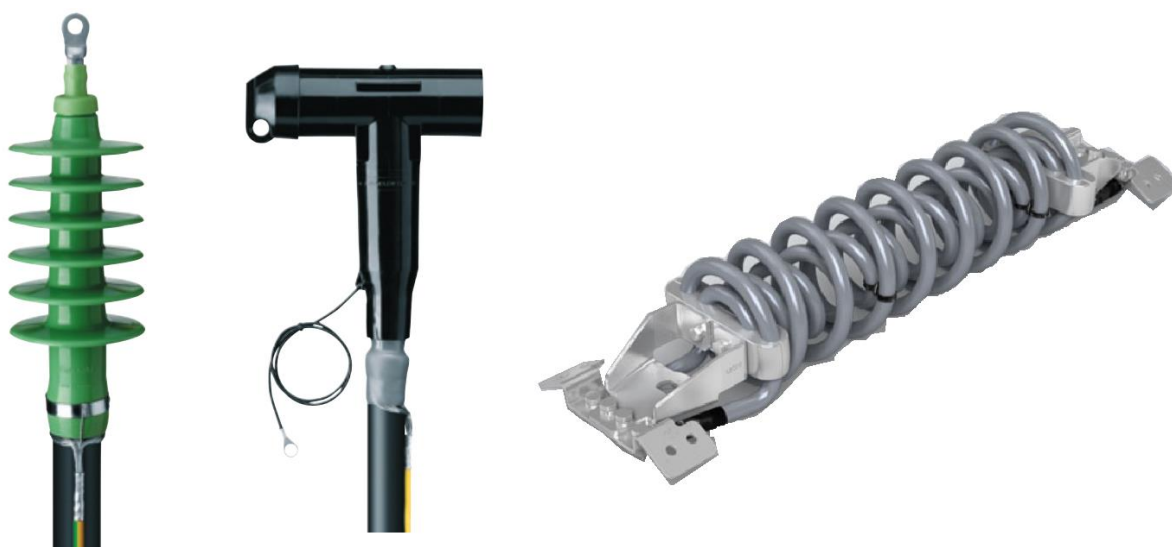
Z výsledku rovnice (6.13) vidíme, že skutečně dle předpokladu dochází na očekávané 50 m délce kabelu pouze k minimálnímu úbytku napětí okolo 3 V, kabel tedy bez problémů vyhoví.

Dimenzování na základě mechanických a provozních vlastností a podmínek

Aby byla zaručena dostatečná mechanická odolnost kabelů, je v souladu s ČSN EN 50 343 nutné, aby kabely byly mechanicky upevněny nebo uchyceny ve vzdálenostech nejvýše 300 mm pro horizontální uložení a 500 mm pro vertikální. Pro ukončování kabelů se použijí koncovky nebo konektory, zajišťující homogenní průběh intenzity elektrického pole. Stínění kabelu musí být minimálně na jedné straně uzemněno, doporučené je však co možná nejčastější spojení s vozidlovou skříní, tj. alespoň na obou koncích kabelu. [30]

U neizolovaných částí rozvodu (holé vodiče, kabelová oka a přípojnice) musí být dodrženy dostatečné povrchové a vzdušné vzdálenosti. K tomu účelu slouží podpěrné izolátory, vyrobené nejčastěji z lící pryskyřice nebo silikonové pryže. Výška podpěrného izolátoru tvoří v podstatě dostatečnou vzdušnou vzdálenost pro zabránění přeskoků, tvar izolátoru pak dostatečnou délkou povrchové cesty zajišťuje ochranu proti nebezpečí plazivých proudů.

Většina součástek pro rozvod proudu je umístěna v prostředí bez ochrany proti povětrnostním vlivům, je tedy u nich vyžadována odolnost vůči účinkům světla a UV záření, odolnost proti ozonu (u pryžových a plastových částí) a vyšší mechanická výdrž.



Obr. 6.9: Příklad kabelové koncovky (vlevo), konektoru (uprostřed) a spirály pro mezivozový přechod (vpravo). [53]

6.2 Návrh a dimenzování komponent stejnosměrné části rozvodu

Druhá část této kapitoly je zaměřena na komponenty stejnosměrné části rozvodu. Analogicky k předchozí části je nejprve nutné stanovit některé výpočtové hodnoty, společně pro všechny části rozvodu. Jedním ze základních parametrů je **výpočtový proud**, pro který budou prvky navrženy.

Odebíraný proud je kromě trakčního výkonu vlaku značně závislý také na napětí v síti. Každé vozidlo o výkonu vyšším než 2 MW musí být vybaveno voličem proudu nebo výkonu, který by omezoval maximální úroveň jedné z odebíraných veličin v závislosti na napětí v trakčním vedení. V praxi se většinou tento požadavek realizuje stejně jako na střídavé trakci, pro výpočtový proud proto lze psát:

$$I_{C(DC)} = \frac{P_{C(DC)}}{U_{N(DC)}} \quad (6.15)$$

$$I_{C(DC)} = \frac{2664,4}{3} \text{ A} = 888,2 \text{ A}$$

Pro výpočet celkového příkonu a účinnosti platí analogické vztahy jako v případě střídavého napájení jednotky. Souhrnná účinnost rozvodu na vozidle vychází vlivem nepřítomnosti transformátoru a vstupního měniče mírně lépe, je však mnohonásobně „vykoupena“ výrazně horší účinností infrastrukturní části rozvodu (která se ale v tomto výpočtu pochopitelně neprojeví):

$$P_{C(DC)} = \frac{P_T}{\eta_{C(DC)}} + P_{AUX} = \frac{2200}{0,90} + 220 \text{ kW} = 2664,4 \text{ kW} \quad (6.16)$$

$$\eta_{C(DC)} = \prod_i \eta_i = \eta_M \cdot \eta_{ASM} \cdot \eta_P = 0,97 \cdot 0,95 \cdot 0,98 = 0,90 \quad (6.17)$$

6.2.1 Sběrač proudu DC

Sběrač proudu stejnosměrného systému se volí na základě velmi podobných hledisek, jako pantograf pro napájecí soustavu střídavou (viz kapitola 6.1.1). Pro navrhovanou jednotku bude zvolen sběrač proudu v souladu s normou ČSN 50 206-1 [25] a na základě následujících kritérií:

- **Jmenovité napětí a frekvence** – sběrač je určen pro provoz v síti 3 kV DC.
- **Jmenovitý proudový odběr, jízda** – pro jízdní režim byl výpočtem určen v předchozí části, viz rovnice (6.15).
- **Jmenovitý proudový odběr, stání** – oproti střídavým sítím je riziko bodového přehřívání smykadla díky vyšším odebíraným proudům výraznější. Maximální proudový odběr stanovený v TSI Energie činí 200 A. Minimální jmenovitou hodnotu určíme podle vztahu:

$$I_{Cs(DC)} = \frac{P_{AUX}}{U_{\min 2(DC)}} = \frac{220}{2} \text{ A} = 110 \text{ A} \quad (6.18)$$

- **Jmenovitý krátkodobý nadproud** – sběrač se nachází ještě před hlavním vypínačem jednotky, a tedy je jistěn pouze výkonovým vypínačem v trakční napájecí stanici. Proto musí být dostatečně dimenzován tak, aby při případných poruchách v soustavě nedošlo k jeho poškození. Dle ČSN EN 50 388 by v síti 3 kV DC měly být uvažovány maximální poruchové proudy o velikosti 50 kA.
- **Šířka sběrače** – šířka je shodná jako u střídavého systému, tj. je používán sběrač o šířce 1950 mm.
- **Materiál sběrací lišty** – na stejnosměrných soustavách se používají v našich podmínkách měďno-grafitové lišty.

Požadovaným parametřům na základě analýzy katalogových listů vyhoví například sběrač výrobce *Stemmann Technik*, typ DSA 150DC – technickou specifikaci zvoleného sběrače shrnuje následující tabulka.

Tab. 6.7: Technické parametry uvažovaného sběrače pro stejnosměrný systém. [49]

Technické parametry	
Výrobce, typ	Stemmann Technik, DSA 150DC
Druh sběrače	jednoramenný, pneumaticky ovládaný
Jmenovité napětí	3 kV DC
Jmenovitý proudový odběr, jízda	1000 A
Jmenovitý proudový odběr, stání	120 A
Jmenovitý krátkodobý nadproud	50 kA / 1 s
Maximální provozní rychlost	160 km/h
Minimální pracovní výška	300 mm
Maximální pracovní výška	2 400 mm
Doba spouštění z max. výšky	4–6 s
Doba zdvihu do max. výšky	5–7 s
Šířka sběrače	1 950 mm
Materiál sběrací lišty	měď-grafit
Statická přitlačná síla	nastavitelná v rozmezí 90–120 N
Hmotnost	cca. 145 kg
Rozsah provozních teplot	-35 °C ... +70 °C

6.2.2 Hlavní vypínač a zemnicí odpojovač DC

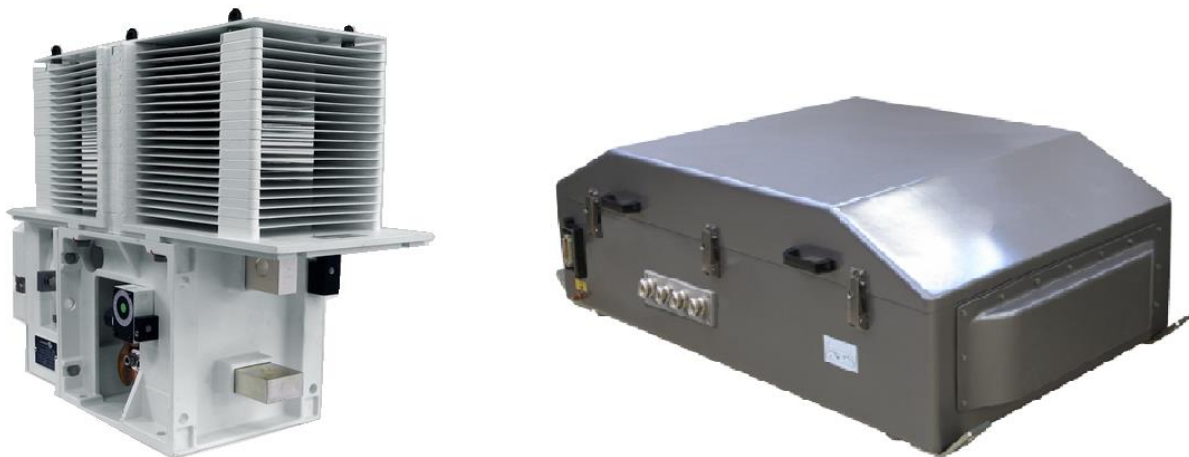
Hlavní vypínač stejnosměrného systému se volí na základě obdobných hledisek, jako vypínač pro napájecí soustavu střídavou (viz kapitola 6.1.2). Pro navrhovanou jednotku bude zvolen hlavní vypínač v souladu s normou ČSN EN 60 077-3 [32] a na základě následujících kritérií:

- **Druh vypínače** – proud omezující rychlovypínač s přirozeným chlazením, vybavený elektromagnetickým vyfukováním oblouku a okamžitým přímým rozepnutím v případě nadproudu. Vypínač se obvykle dodává již jako kompletní zařízení ve střešním kontejneru.
- **Jmenovité napětí** – vypínač je určen pro provoz v síti 3 kV DC.
- **Maximální napětí** – hodnota maximálního napětí musí být vyšší, než je velikost nejvyššího krátkodobého napětí v síti, tj. 3,9 kV.
- **Jmenovitý proud** – tato hodnota musí být bezpečně vyšší, než je hodnota získaného výpočtového proudu v rovnici (6.15).
- **Jmenovitý vypínací proud** – hlavní vypínač vozidla primárně musí být schopen vypnout zkraty za síťovým filtrem. Zkraty před síťovou tlumivkou jsou zpravidla vypínány mohutnými výkonovými vypínači v měnících.

Požadovaným parametrům na základě analýzy katalogových listů vyhoví například rychlovypínač výrobce *Sécheron*, typ UR26 – technickou specifikaci zvoleného vypínače shrnuje následující tabulka.

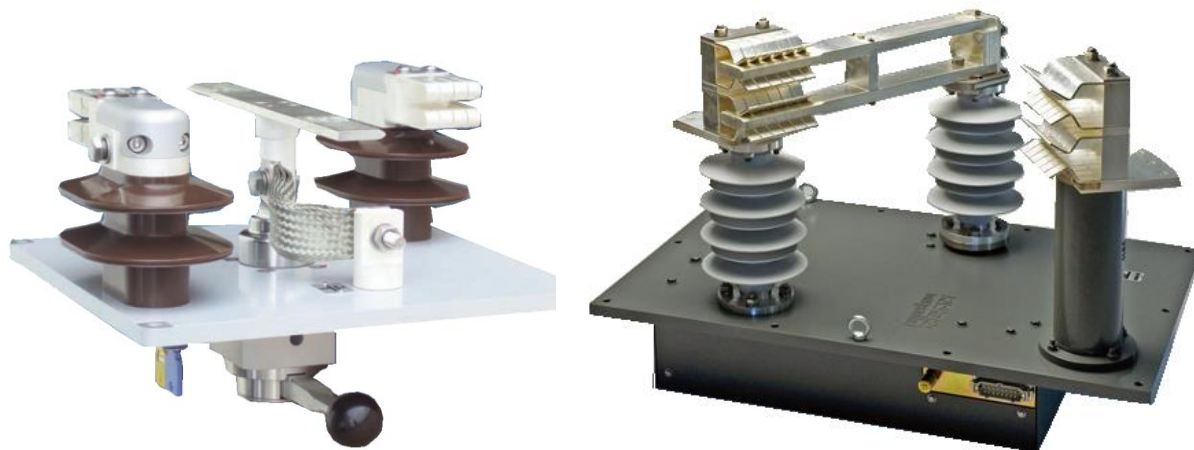
Tab. 6.8: Technické parametry uvažovaného hlavního vypínače pro stejnosměrný systém. [54]

Technické parametry	
Výrobce, typ	Sécheron, UR26
Druh vypínače	rychlovypínač ve střešním kontejneru
Jmenovité napětí	3,6 kV DC
Maximální napětí	4,8 kV
Jmenovité impulzní výdržné napětí	40 kV
Jmenovitý proud	2 600 A
Jmenovitý vypínací proud	35 kA
Vypínací doba	15-30 ms
Zapínací doba	150 ms
Hmotnost	cca. 133 kg
Rozsah provozních teplot	-25 °C ... +40 °C



Obr. 6.10: Hlavní vypínač se zhášení komorou (vlevo) a montážní kontejner (vpravo), upraveno. [54]

Oproti střídavým soustavám není stejnosměrný zemnicí odpojovač konstrukčně spojen s hlavním vypínačem. Principiální funkce zařízení je však totožná – odpojovač slouží k bezvýkonovému spínání nebo odpojování částí rozvodu, případně i k jejich současnému uzemnění. Při návrhu se ověřují podobné parametry jako v případě vypínače – ačkoli k manipulacím s odpojovačem dochází jen bez zatížení, zapnuté odpojovače by měly bez poškození po definovanou dobu přestát i účinky zkratových proudů.



Obr. 6.11: Příklad zemnicího odpojovače výrobce Sécheron (vlevo) a odpojovače výrobce RICHARD Murgenthal (vpravo), upraveno. [50] [54]

6.2.3 Svodič přepětí DC

Svodiče přepětí se používají totožné konstrukce jako v případě střídavých sítí (viz kapitola 6.1.3), pouze v provedení s parametry odpovídajícími stejnosměrné napájecí soustavě. Oproti předešlému případu je dále také možné upustit od druhého svodiče přepětí za vypínačem, protože u stejnosměrných soustav nehrozí při spínacích procesech uvnitř vozidla vznik nebezpečného přepětí.

Na základě analýzy katalogových listů a hledisek dle normy ČSN EN 50 526-1 [33] vyhoví například svodič přepětí výrobce *Siemens*, typ 3EB4 040 – technickou specifikaci zvoleného svodiče shrnuje následující tabulka.

Tab. 6.9: Technické parametry uvažovaného svodiče přepětí pro stejnosměrný systém. [51]

Technické parametry	
Výrobce, typ	Siemens, 3EB4 040
Druh svodiče	napětově závislý (varistor ZnO)
Jmenovité napětí sítě	3 kV DC
Trvalé provozní napětí	4 kV
Jmenovité napětí	4 kV
Jmenovité výdržné napětí při atmosférickém přepětí (1,2/50 μ s)	70 kV
Jmenovitý vybíjecí proud	20 kA
Zbytkové napětí při zkoušce impulzem proudu (8/20 μ s)	10 kV
Rozsah provozních teplot	-40 °C ... +40 °C

6.2.4 Měřicí transformátor proudu a napětí DC

V případě stejnosměrných soustav nemohou pasivní měřicí transformátory pochopitelně přenášet žádné proudy ani napětí. Proto se používá elektronických přístrojů, využívajících převážně kompenzační princip. Nevýhodou tohoto řešení je nutné externí napájení, měřicí přístroje také nejsou příliš robustní a při venkovním použití se musí umístit do speciálních uzavřených boxů. Při návrhu je také nutné dbát na omezení možného vlivu cizích polí.

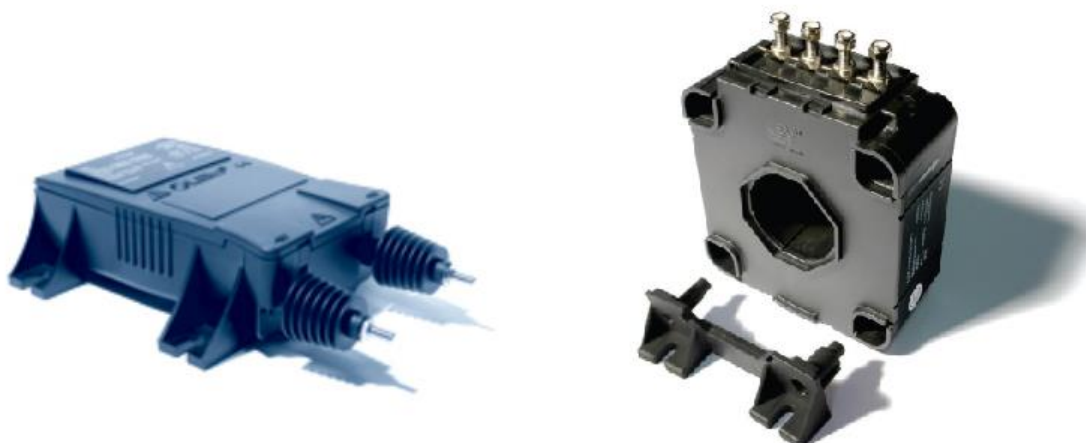
Požadovaným parametrům na základě souboru norem ČSN EN 60 044 [34],[35] a analýzy katalogových listů vyhoví například měřicí transformátory napětí *DV 4200/SP4* a proudu *LTC 1000-S* od švýcarského výrobce *LEM* – technickou specifikaci zvolených přístrojů shrnuje následující tabulka.

Tab. 6.10: Technické parametry uvažovaného měřicího transformátoru napětí pro stejnosměrnou soustavu. [55]

Technické parametry	
Výrobce, typ	LEM, DV 4200/SP4
Druh	insulated digital, s proudovým výstupem
Jmenovité napětí primární strana	4 200 V
Měřicí rozsah	6 000 V
Sekundární jmenovitý signál	50 mA
Napájecí napětí	$\pm 15 \dots 24$ V DC
Třída přesnosti	0.5

Tab. 6.11: Technické parametry uvažovaného měřicího transformátoru proudu pro stejnosměrnou soustavu. [56]

Technické parametry	
Výrobce, typ	LEM, LTC 1000-S
Druh	kompensovaný, s Hallovoú sondou
Jmenovitý primární proud	1 000 A
Měřicí rozsah	2 400 A
Sekundární jmenovitý signál	200 mA
Napájecí napětí	$\pm 15 \dots 24$ V DC
Třída přesnosti	0.5
Měření poruchových proudů	Rogowského cívka, typ LEM, RA 1005-S



Obr. 6.12: Měřicí transformátor napětí (vlevo) a měřicí transformátor proudu (vpravo) pro stejnosměrnou soustavu, upraveno. [55] [56]

6.2.5 Návrh kabelových tras DC

Oproti střídavému rozvodu není nutné vzhledem k nižší napěťové hladině řízení intenzity elektrického pole – kabely se většinou používají nestíněné a za předpokladu správného utěsnění je možné použít připojení pomocí konvenčních kabelových ok.

Nutným předpokladem pro výběr vhodného kabelu je jeho certifikace výrobcem pro použití na drážních vozidlech. Pro navrhovanou elektrickou jednotku byl vybrán kabel *RADOX 9 GKW-AX* od výrobce *Huber+Suhner*, jeho parametry shrnuje Tabulka 6.12.

Tab. 6.12: Technické parametry uvažovaného kabelu pro rozvod stejnosměrného proudu. [57]

Technické parametry	
Výrobce, typ	Huber+Suhner, RADOX
Druh kabelu	9 GKW-AX (měděné jádro, bezhalogenová izolace, dvojité opláštění)
Průřez jádra	185 mm ²
Odpor jádra kabelu (pro T = 20 °C)	0,108 Ω/km
Maximální proudové zatížení kabelu při T _{okolí} = 45 °C	560 A
Jmenovité napětí (fázové/sdružené)	3,6/6 kV
Maximální provozní napětí	7,2 kV
Výdržné impulzní napětí	250 kV
Jmenovité výdržné napětí při atmosférickém přepětí (1,2/50 μs)	250 kV
Maximální dovolená provozní teplota jádra kabelu	+90 °C
Maximální dovolená teplota jádra kabelu při zkratu	+200 °C
Rozsah provozních teplot	-40 °C ... +90 °C

U vyhovujícího typu kabelu (tj. rodiny kabelu) je dále nutné ověřit na základě kritérií popsaných v normě ČSN EN 50 343 **průřez jeho jádra**. Kontroluje se zejména [30]:

- Dimenzování na základě zatěžovacího proudu
- Dimenzování na základě zkratového proudu (maximální dovolené oteplení kabelu)
- Dimenzování na základě úbytku napětí
- Dimenzování na základě mechanických a provozních vlastností a podmínek

Postup je ve většině kroků analogický k návrhu střídavé části rozvodu, proto jsou dále některé výpočty uváděny pouze zjednodušeně, bez vysvětlení jednotlivých veličin a podrobnější výklad lze najít v části 6.1.5.

Dimenzování na základě zatěžovacího proudu

Nejprve je třeba přepočítat maximální proudové zatížení uvedené výrobcem v katalogovém listu kabelu tak, aby zohledňovalo skutečné uložení kabelu, teplotu okolí i předpokládanou životnost kabelu [30]:

$$I_{corr(DC)} = I_{cable(DC)} \cdot k_{1(DC)} \cdot k_{2(DC)} \cdot k_{3(DC)} \cdot k_{4(DC)} \cdot k_{5(DC)} \quad (6.19)$$

$$k_{1(DC)} = \sqrt{\frac{T_{c(max)} - T_{o(max)}}{T_{c(max)} - T_{ref}}} \quad (6.20)$$

$$I_{corr(DC)} = 560 \cdot 1,054 \cdot 0,81 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \text{ A} = 478,1 \text{ A}$$

$$k_{1(DC)} = \sqrt{\frac{90 - 40}{90 - 45}} = 1,054$$

Oproti střídavé soustavě uvažujeme kromě střešního vedení i uložení kabelu na lávce, v konstrukci stropu nebo pod podlahou, proto volíme korekční faktor $k_2=0,81$.

Musí platit, že korigovaná proudová zatížitelnost kabelu je vyšší než vypočtený zatěžovací proud. V tomto případě uvažujeme rozdělení proudu mezi dva kabely stejného průřezu, kdy každý z kabelů napájí polovinu spotřeby trakční jednotky (tj. jeden krajní trakční vůz):

$$\frac{I_{C(DC)}}{2} \leq I_{corr(DC)} \quad (6.21)$$

$$444,1 \text{ A} \leq 478,1 \text{ A}$$

Z rovnice (6.21) je patrné, že podmínka je s dostatečnou rezervou splněna. Z pohledu trvalé proudové zatížitelnosti lze vodič pro dané charakteristiky provozu použít.

Dimenzování na základě zkratového proudu

Maximální efektivní hodnota zkratového proudu, se kterou se má ve výpočtu počítat, je stanovena v ČSN EN 50 388 a pro síť 3 kV DC jde o hodnotu 50 kA. Druhým důležitým parametrem je doba průchodu tohoto zkratového proudu – opět vyjdeme z hodnot doporučených pro výpočet v normě ČSN EN 50 388, kdy vypínací časy hlavního vypínače na vozidle i vypínače v napájecí stanici se obvykle v případě proudů maximálních nebo jim blízkých pohybují od 20 do 60 ms. [13] Údaj uvedený v katalogovém listu výrobce hlavního vypínače, tj. doba vypnutí menší než 30 ms, tomuto předpokladu odpovídá. [54]

Pro minimální průřez vodiče pak musí být splněno [31]:

$$S_{\min(DC)} = \frac{\sqrt{I_{ke(DC)}^2 \cdot t_k}}{k_{(DC)}} \quad (6.22)$$

$$k_{(DC)} = \sqrt{\frac{c_v(\beta + 20)}{\rho_{20}} \cdot \ln\left(\frac{\beta + \mathcal{G}_k}{\beta + \mathcal{G}_1}\right)} \quad (6.23)$$

$$S_{\min(DC)} = \frac{\sqrt{(50 \cdot 10^3)^2 \cdot 0,1}}{122,1} = 129,6 \text{ mm}^2$$

$$k_{(DC)} = \sqrt{\frac{(3,45 \cdot 10^{-3}) \cdot (234,5 + 20)}{17,241 \cdot 10^{-6}} \cdot \ln\left(\frac{234,5 + 200}{234,5 + 90}\right)} = 122,1 \text{ A} \cdot \text{s}^{0,5} \cdot \text{mm}^{-2}$$

Analogicky k maximální proudové zatížitelnosti musí platit, že spočtený minimální průřez jádra kabelu je vyšší než průřez navržený:

$$S_{\min(DC)} \leq S_{\text{cable}(DC)} \quad (6.24)$$

$$129,6 \text{ mm}^2 \leq 185 \text{ mm}^2$$

Z nerovnosti (6.24) opět vidíme, že průřez i v tomto kritériu vyhoví.

Dimenzování na základě úbytku napětí

Dále je možné kontrolovat kabel na úbytek napětí, ten lze vypočítat dle následujícího vztahu:

$$\Delta U = R \cdot I = R_k \cdot I \cdot \frac{I_{C(DC)}}{2} \quad (6.25)$$

$$R_{g1} = R_{g2} \left[1 + \alpha_{Cu} (\mathcal{G}_1 - \mathcal{G}_2) \right] \quad (6.26)$$

$$\Delta U_f = 0,138 \cdot 0,1 \cdot 444,1 = 6,13 \text{ V}$$

$$R_k = R_{g0} = 0,108 \cdot \left[1 + 3,93 \cdot 10^{-3} \cdot (90 - 20) \right] = 0,138 \text{ } \Omega \cdot \text{km}^{-1}$$

Z výsledku rovnice (6.25) vidíme, že na kabelovém vedení délky 100 m dochází pouze k minimálnímu úbytku napětí okolo 6 V, kabel tedy bez problémů vyhoví.

6.3 Celkové schéma a prostorové řešení komponent přívodu proudu

Celkové prostorové uspořádání komponent a koordinace izolace je odvozena zejména od následujících kritérií:

- Dodržení dostatečné vzdušné vzdálenosti
- Dodržení dostatečné délky povrchové cesty
- Dodržení dostatečné izolační vzdálenosti od okolních objektů

Vzdušná vzdálenost

Minimální vzdušná vzdálenost (tj. nejkratší vzdálenost ve vzduchu mezi dvěma vodivými objekty) je dána napětím trakční sítě a průraznou pevností vzduchu (v homogenním poli cca 25 kV/cm). Ovšem v podmínkách trakčních vozidel takovéto dimenzování zdaleka nestačí. Dále je velmi podstatným parametrem i možný výskyt vysokých impulzních přepětí, pramenících například z atmosférických výbojů. Velikost těchto přepětí je charakterizována pomocí tzv. kategorie přepětí. V neposlední řadě je třeba v úvahu vzít i skutečnost, že většina součástek pro rozvod proudu je umístěna v prostředí bez ochrany proti povětrnostním vlivům, a je tedy nutné zohlednit i tzv. stupeň znečištění.

Pro nejčastěji uvažovanou kategorii přepětí OV3 (obvody přímo spojeny s trakčním vedením, avšak s ochranou proti přepětí) a stupeň znečištění PD4 (občasná vodivost s periodickým čištěním, možný výskyt deště, ledu, sněhové pokrývky, mlhy) jsou hodnoty minimálních vzdušných vzdáleností uvedeny v Tabulce 6.13.

Délka povrchové cesty

Minimální délka povrchové cesty (tj. nejkratší vzdálenost mezi dvěma vodivými objekty podél izolovaného povrchu) závisí opět na trvalém napětí trakční sítě a stupni znečištění. Oproti vzdušné vzdálenosti je třeba vzít v úvahu i izolační vlastnosti materiálu. Naopak žádný významnější vliv nemají krátkodobá přepětí, protože přeskok povrchovou cestou je způsoben relativně pomalým termickým postupem. Pro stupeň znečištění PD4 a izolační skupinu I (zahrnující i nejčastěji používané silikonové izolátory) jsou opět hodnoty minimálních povrchových vzdáleností uvedeny v Tabulce 6.13.

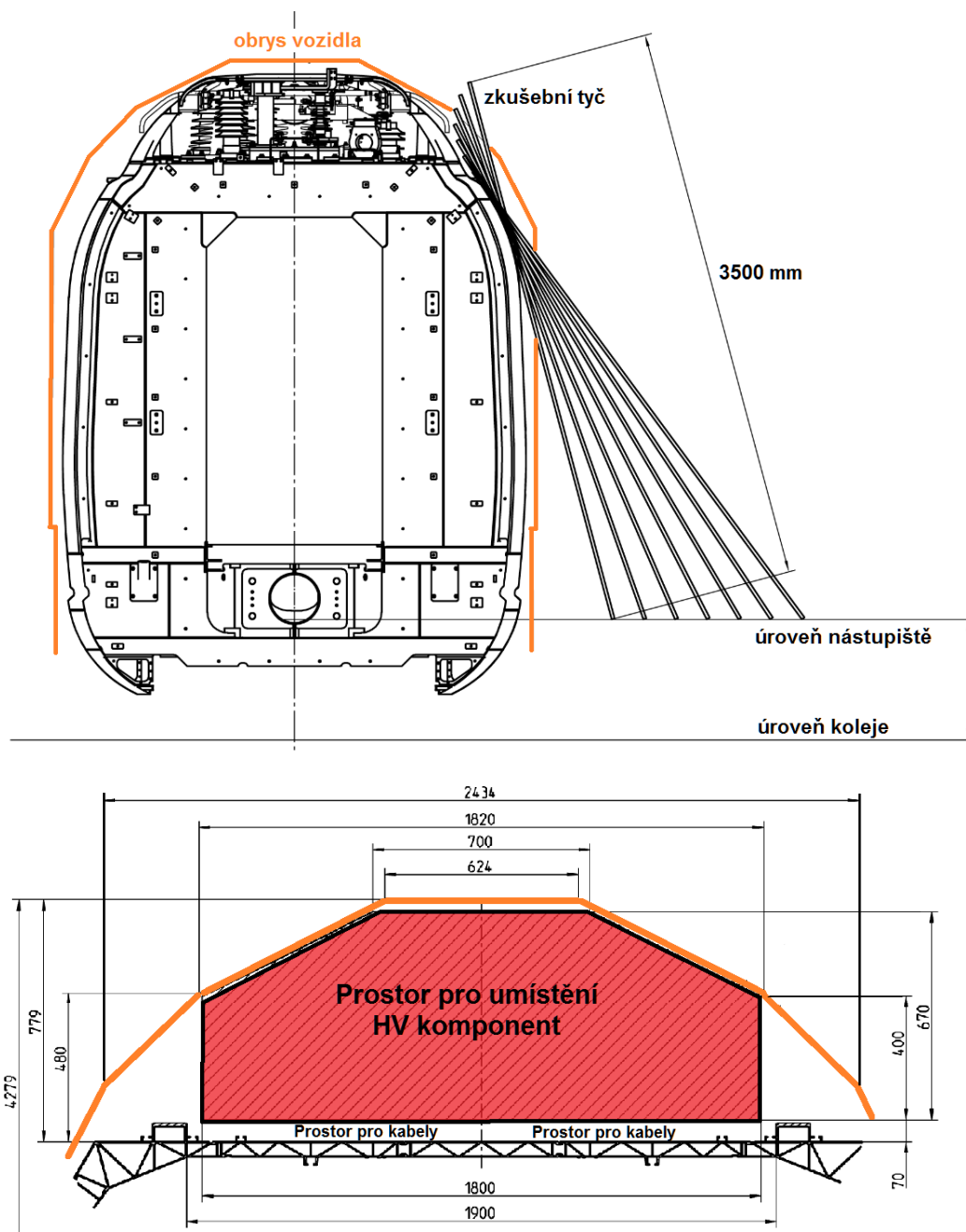
Tab. 6.13: Minimální hodnoty vzdušných vzdáleností a délek povrchových cest. [36]

Sít'	$U_{\max 1}$	$U_{\text{impulzní}}$	Min. vzdušná vzdálenost (OV3/PD4)	Min. povrchová vzdálenost (izol. sk. I, PD4)
3 kV DC	3,6 kV	25 kV	45 mm	90 mm
25 kV AC	27,5 kV	125 kV	230 mm	687,5 mm

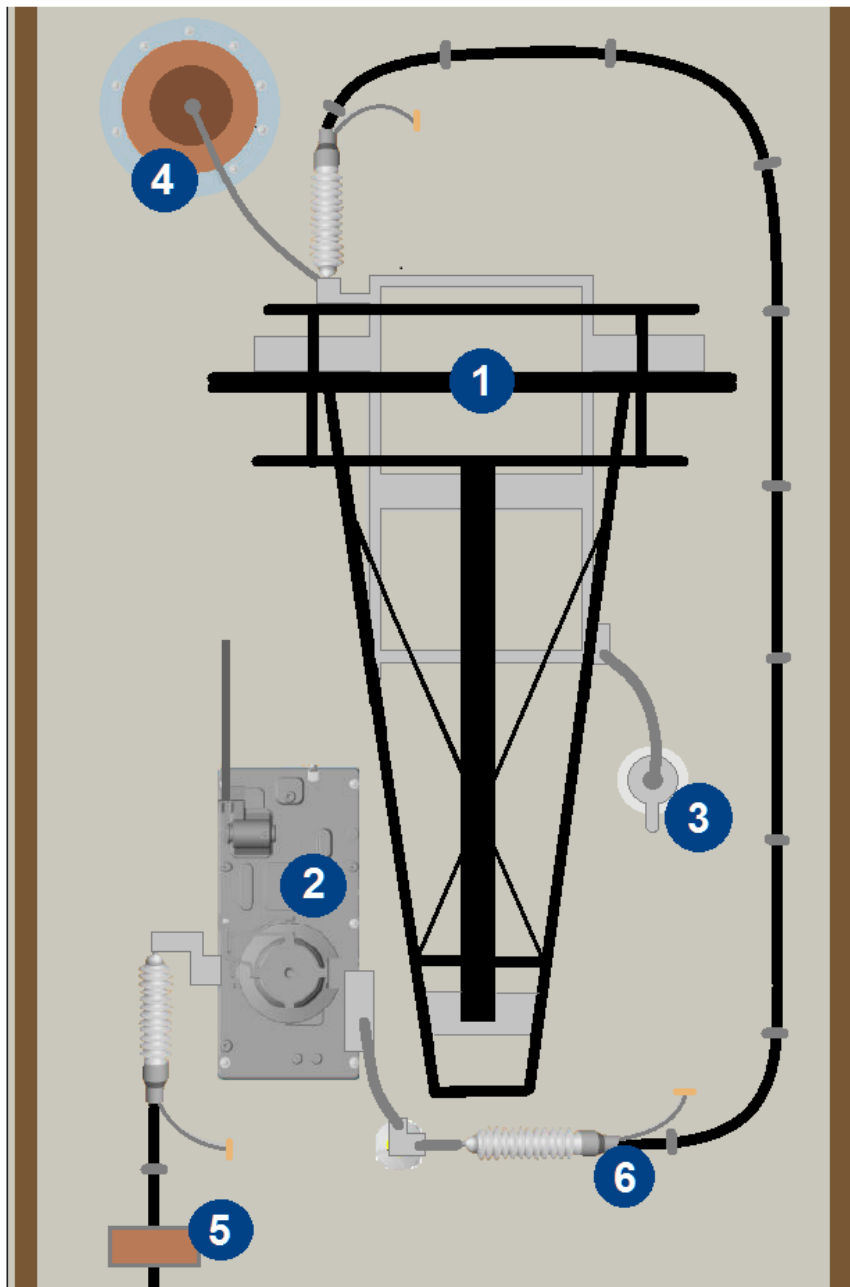
Izolační vzdálenost od okolí

Uspořádání komponent vysokonapětového rozvodu na střeše vozidla se volí tak, aby byla dodržena minimální vzdušná i povrchová vzdálenost od okolních objektů. Současně je třeba správným umístěním jednotlivých prvků zabránit i nechtěnému dotyku osobami, které se mohou v okolí vozidla pohybovat – k tomu účelu se pro ověření používá metoda tzv. zkušební tyče (viz horní část Obr. 6.13). Za aktivní prvky se v tomto případě považují i izolátory spojené s živými částmi rozvodu.

Výsledkem je ohraničená oblast, znázorněná v dolní části Obrázku 6.13, do které je nutné jednotlivé komponenty umístit.

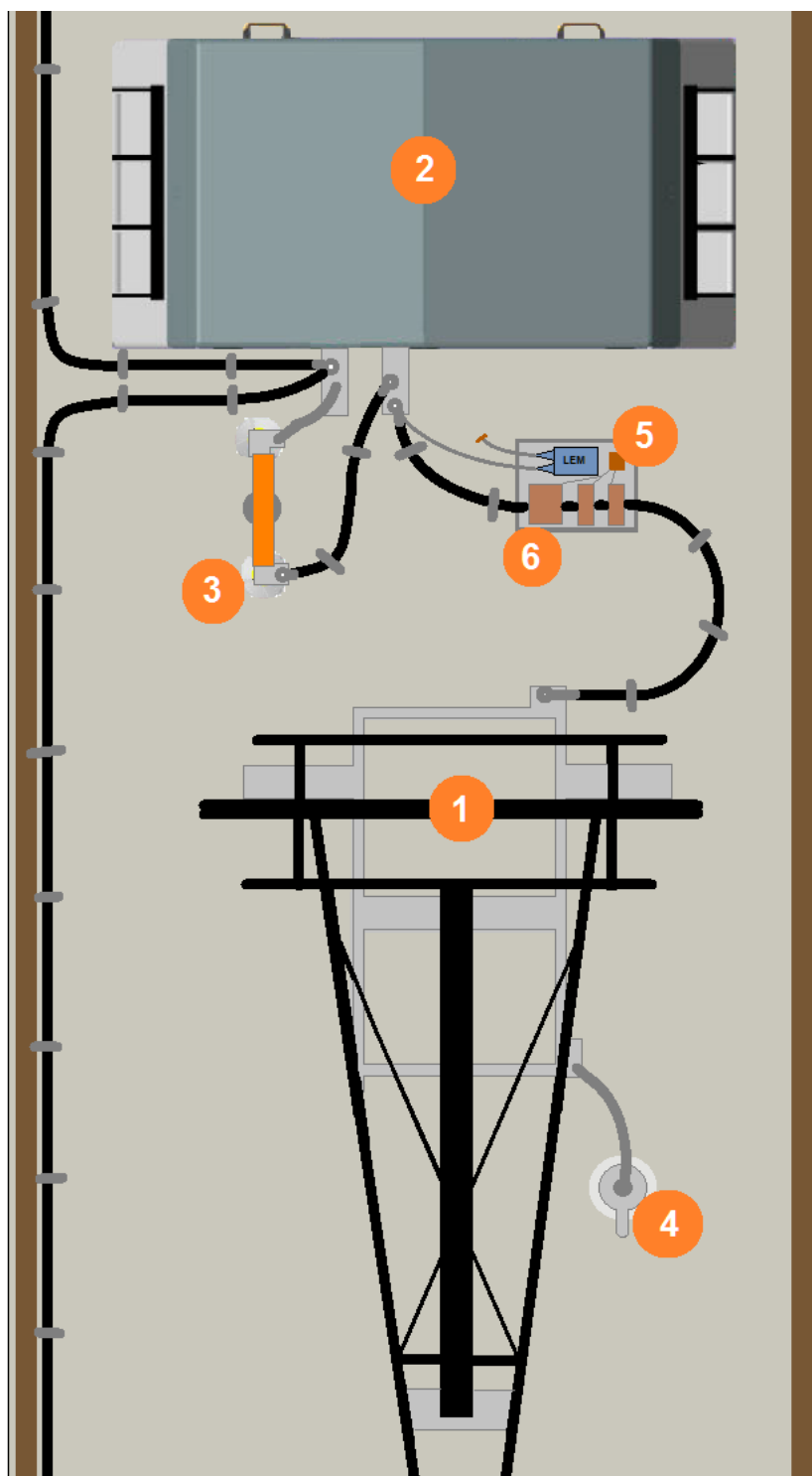


Obr. 6.13: Vymezení střešního prostoru pro umístění vysokonapětových komponent, podklad převzatý z [39].



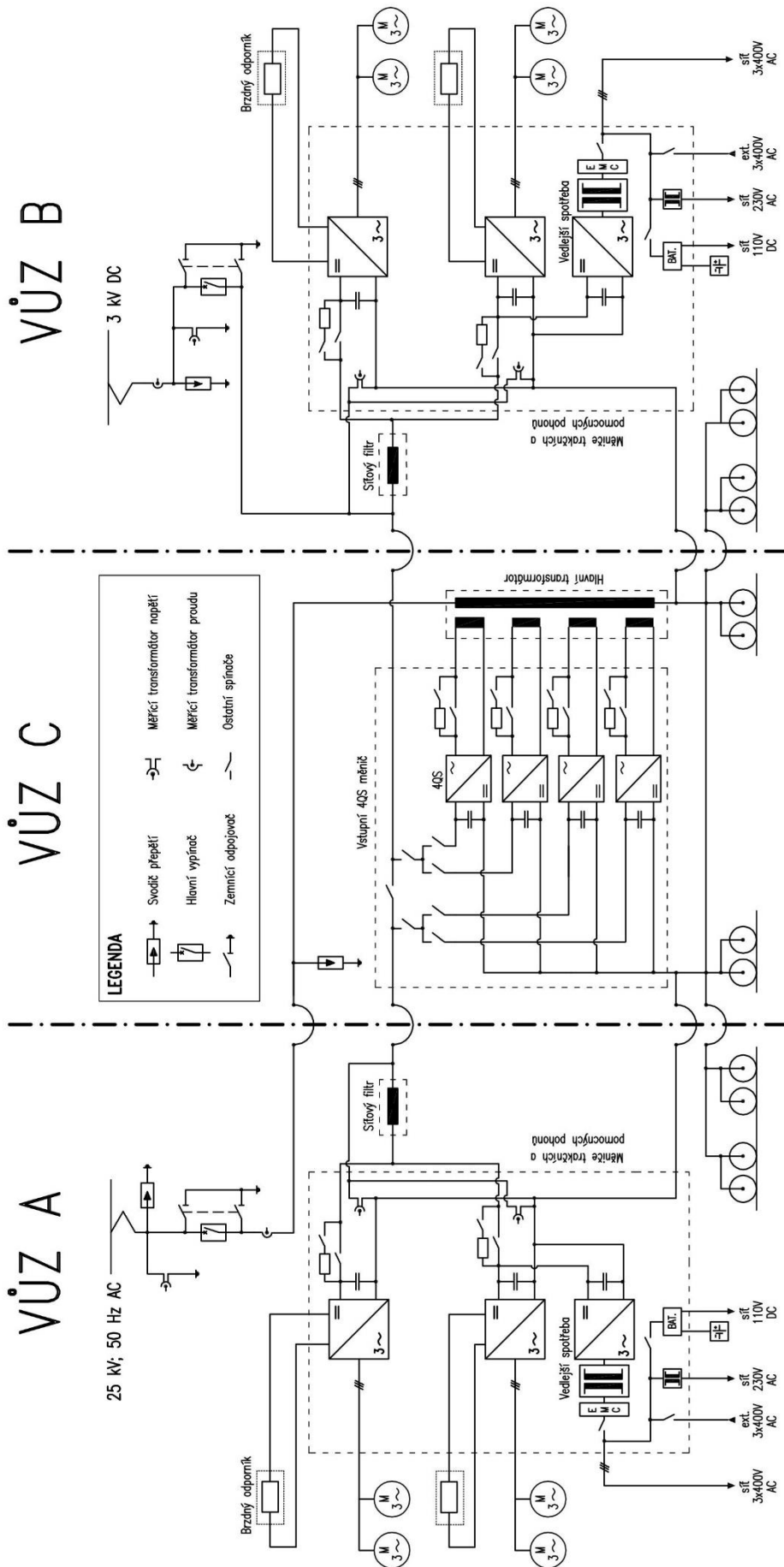
- | | |
|-------------------|-------------------------------|
| 1 Proudový sběrač | 4 Měřicí transformátor napětí |
| 2 Hlavní vypínač | 5 Měřicí transformátor proudu |
| 3 Svodič přepětí | 6 Kabelová koncovka |

Obr. 6.14: Prostorové uspořádání komponent střídavého rozvodu v oblasti pantografového sběrače.



- | | |
|-------------------|-------------------------------|
| 1 Proudový sběrač | 4 Svodič přepětí |
| 2 Hlavní vypínač | 5 Měřicí transformátor napětí |
| 3 Zemní odpojovač | 6 Měřicí transformátor proudu |

Obr. 6.15: Prostorové uspořádání komponent stejnosměrného rozvodu v oblasti pantografového sběrače.



Obr. 6.16: Celkové schéma silnoprúduého rozvodu navrhované elektrické jednotky.

7 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ KOMPONENT ZPĚTNÉ CESTY PROUDU

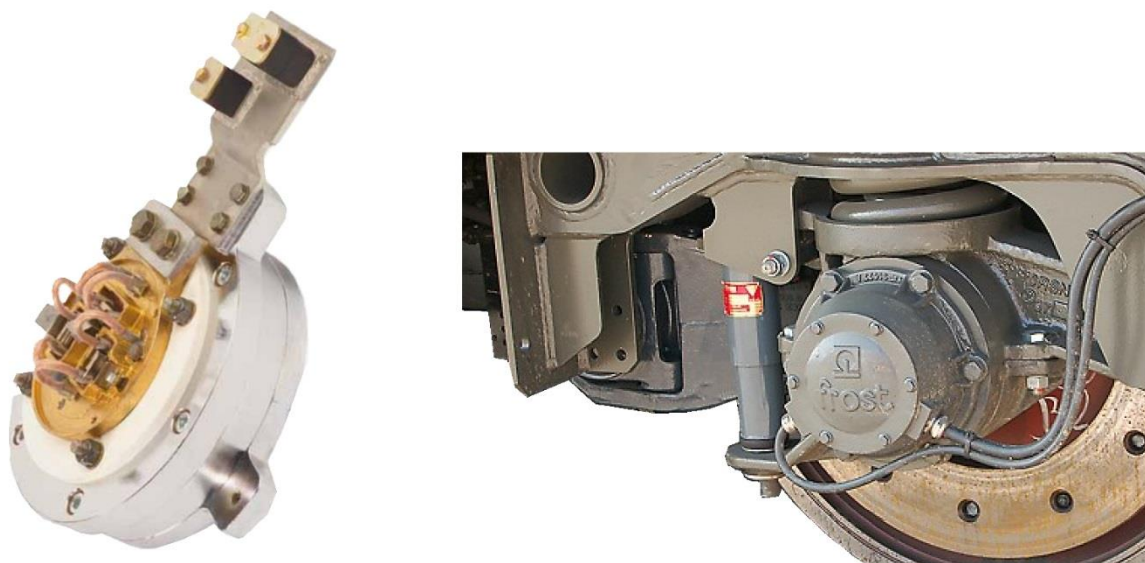
Úkolem prvků tvořících zpětnou proudovou cestu je, jak už název napovídá, zajistit odvod zpětného proudu z trakčních zařízení na vozidle zpět do kolejnice a následně do napájecí stanice. Zároveň však musí být kromě proudů pracovních dimenzovány i na případné poruchové stavy, kdy dojde k vnitřnímu zkratu na hnacím vozidle či pádu trolejového vedení na kostru vozu. V tomto případě je účelem ochrana osob a zařízení před nebezpečným dotykovým napětím.

Podle zmíněného účelu dělíme komponenty do dvou skupin:

- **Pracovní uzemnění**
- **Ochranné uzemnění**

Ochranné a pracovní uzemnění může být provedeno buďto odděleně nebo jako společná soustava. Společná soustava je řešením jednodušším, má však i své nevýhody. Jednou z hlavních je fakt, že vozidlová skříň z hliníkové slitiny je daleko lepší vodič než ocelové kolejnice. Pokud tedy na řadě míst vozidla provedeme nízko-impedanční spojení se zemním potenciálem, zpětný proud (kupř. z jiných vozidel na trati) nepoteče kolejnicí, ale přes skříň vozidla. Tento jev je s ohledem na možné značné velikosti proudů silně nežádoucí. Ochranné uzemnění se proto často provádí pouze na několika (minimálně však dvou) k sobě přilehlých podvozcích a odděleně od pracovní cesty zpětného proudu. Ostatní podvozky jsou od kolejnice izolované.

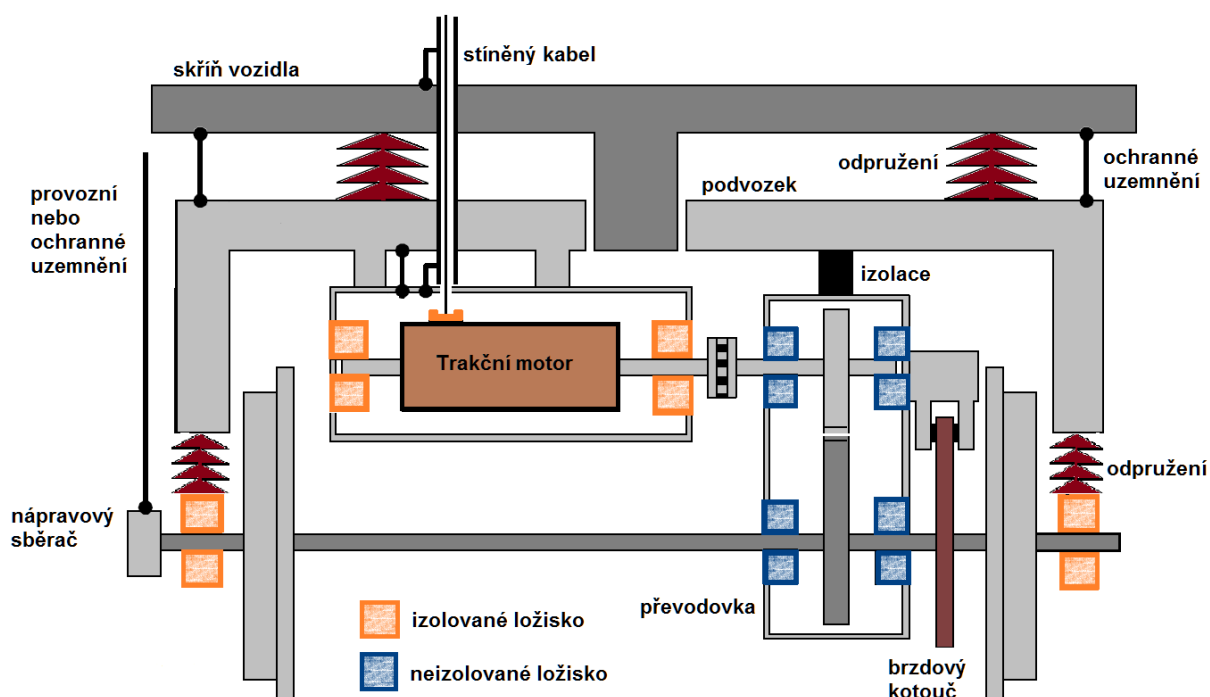
Jak u pracovního, tak ochranného uzemnění je třeba dále dbát na to, aby proud netekl skrze ložiska náprav, ale přes nápravové sběrače k tomuto účelu určené (viz Obr. 7.1). V úvahu je nutné vzít i možnou „třetí cestu“, kterou mohou představovat neodizolované brzdy, stínění kabelů či převodovka.



Obr. 7.1: Nápravový sběrač od výrobce Stemmann Technik, upraveno. [49]

7.1 Pracovní uzemnění

Pracovní uzemnění slouží pro odvod zpětného proudu z trakčních zařízení na vlakové soupravě zpět do kolejnice. Pokud je na vozidle více nápravových sběračů sloužících k pracovnímu uzemnění společné sběrnice, je vhodné, aby přívodní vodiče měly, pokud možno, stejnou délku. V případě, že toho není možné dosáhnout, je třeba vhodným průřezem zajistit stejný elektrický odpor těchto paralelních cest. S určitou nerovnováhou je však třeba počítat i nadále, a to vlivem nezanedbatelného odporu kolejnice vůči kolejovému vozidlu a toku zpětného proudu cestou nejnižšího celkového odporu.



Obr. 7.2: Schéma řešení komponent zpětného proudu na podvozku.

7.2 Ochranné uzemnění

K ochrannému uzemnění musí být připojeny veškeré vodivé části vozidla, jichž je možné se dotknout, a které mohou nabývat nebezpečného dotykového napětí v případě poruchy. Uzemněny musí být také další komponenty, jako jsou rámy podvozků, motory, trakční kontejnery apod. Podle ČSN EN 50 153 [37] je nutné, aby vodivé spojení mezi rámem vozidla a kolejnicí bylo provedeno alespoň na dvou místech, a to takovým způsobem, aby ani při přerušení jednoho z těchto spojení nemohlo dojít ke vzniku nebezpečných dotykových napětí. Všechna ochranná uzemnění musí být umístěna viditelně tak, aby byla umožněna snadná kontrola stavu tohoto spojení. Je nutné si uvědomit a mít na paměti, že v případě odděleného pracovního a ochranného uzemnění se případné přerušení spojení do okamžiku poruchy nijak neprojeví a vozidlo se zdá být plně funkční.

Při dimenzování se podobně jako v případě kabelových tras vychází z velikosti zkratových proudů a doby jejich trvání. Během průchodu zkratového proudu neuvažujeme vzhledem k velmi krátké době trvání odvod tepla sáláním ani prouděním. Proto platí, že teplo vzniklé průchodem proudu ve vodiči se rovná teplu v něm akumulovanému.

$$dQ_{pr} = dQ_{aku} \quad (7.1)$$

kde: Q_{pr} je teplo vzniklé průchodem proudu [J]
 Q_{aku} je teplo ve vodiči akumulované [J]

Pokud dále rozepíšeme akumulované teplo podle kalorimetrické rovnice a teplo vzniklé průchodem proudu vyjádříme Joulovými ztrátami, dostaneme následující vztah:

$$\int_0^{t_k} R(\vartheta) \cdot i_k^2(t) dt = \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_k} c_v \cdot V d\vartheta \quad (7.2)$$

kde: R je odpor vodiče [Ω]
 i_k je zkratový proud [A]
 t_k je doba trvání zkratu [s]
 ϑ_1 je počáteční teplota [$^{\circ}\text{C}$]
 ϑ_k je konečná teplota [$^{\circ}\text{C}$]
 c_v je objemová tepelná kapacita materiálu [$\text{J} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$]
 V je objem vodiče [m^3]

Časově proměnný zkratový proud lze nahradit podle rovnice (7.3) ekvivalentním oteplovacím proudem I_{ke} . To je proud, který by vyvolal stejné tepelné účinky za dobu trvání zkratu, jako časově proměnný zkratový proud.

$$I_{ke} = \sqrt{\frac{1}{t_k} \int_0^{t_k} i_k^2(t) dt} \quad (7.3)$$

Dosadíme-li hodnoty ekvivalentního oteplovacího proudu do rovnice (7.2), pak dostáváme následující tvar rovnice:

$$R(\vartheta) \cdot I_{ke}^2 \cdot t_k = \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_k} c_v \cdot V d\vartheta \quad (7.4)$$

Po další matematické úpravě dojdeme k následujícímu vztahu:

$$I_{ke}^2 \cdot t_k = \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_k} \frac{c_v \cdot V}{R(\vartheta)} d\vartheta \quad (7.5)$$

Závislost odporu vodiče na teplotě následně vyjádříme dle vztahu (7.6) a dosadíme do rovnice (7.5):

$$R(\vartheta) = R_i \cdot \frac{\beta + \vartheta}{\beta + \vartheta_i} \quad (7.6)$$

$$I_{ke}^2 \cdot t_k = \int_{\vartheta_i}^{\vartheta_k} \frac{c_v \cdot V}{R_i} \cdot \frac{\beta + \vartheta_i}{\beta + \vartheta} d\vartheta \quad (7.7)$$

kde: R_i je odpor vodiče při teplotě ϑ_i [Ω]
 β je reciproká hodnota teplotního součinitele rezistivity pro vodič daného materiálu [$^{\circ}\text{C}$]

Následnou integrací vztahu (7.7) dostáváme:

$$I_{ke}^2 \cdot t_k = \frac{c_v \cdot V}{R_i} \cdot (\beta + \vartheta_i) \cdot \int_{\vartheta_i}^{\vartheta_k} \frac{1}{\beta + \vartheta} d\vartheta \quad (7.8)$$

$$I_{ke}^2 \cdot t_k = \frac{c_v \cdot V}{R_i} \cdot (\beta + \vartheta_i) \cdot \ln\left(\frac{\beta + \vartheta_k}{\beta + \vartheta_i}\right)$$

V závěrečném kroku vyjádříme objem (7.9) a rezistivitu (7.10), následně po dosazení do rovnice (7.8) platí:

$$R_i = \rho_i \cdot \frac{l}{S} \quad (7.9)$$

$$V = S \cdot l \quad (7.10)$$

kde: ρ_i je elektrická rezistivita materiálu vodiče při teplotě ϑ_i [$\Omega \cdot \text{m}$]
 S je průřez vodiče [m^2]
 l je délka vodiče [m]

$$I_{ke}^2 \cdot t_k = \frac{c_v \cdot S \cdot l}{\rho_i \cdot \frac{l}{S}} \cdot (\beta + \vartheta_i) \cdot \ln\left(\frac{\beta + \vartheta_k}{\beta + \vartheta_i}\right) \quad (7.11)$$

Vyjádřením průřezu S a matematickou úpravou dostáváme závěrečný vztah:

$$S = \sqrt{\frac{I_{ke}^2 \cdot t_k}{\frac{c_v (\beta + \vartheta_i)}{\rho_i} \cdot \ln\left(\frac{\beta + \vartheta_k}{\beta + \vartheta_i}\right)}} \quad (7.12)$$

Na první pohled je zřejmé, že výsledný vzorec je shodný s rovnicí (6.8), převzatou z normy ČSN EN 33 2000-5-54 [31]. Kromě potvrzení správnosti tohoto odvození z uvedeného zároveň plyne, že i při dimenzování komponent zpětné cesty proudu se postupuje totožně jako v případě předešlém.

Základním předpokladem je, že dimenzování na tepelné účinky zkratového proudu na vozidle musí být vždy robustnější než totožné dimenzování v rozvodně. V praxi by tak neměl nastat případ, kdy by došlo k poškození ochranného uzemnění na vozidla v důsledku včas neodpojeného přívodu proudu z napájecí stanice.

ZÁVĚR

Tato práce se zabývá systémem napájení a návrhem vysokonapěťových komponent elektrické jednotky pro příměstskou a regionální dopravu. V úvodních kapitolách bylo nejprve nastíněno základní rozdělení železničního systému, vycházející ze struktury aktuálně platných evropských norem a nařízení. Současně práce v této části uvádí i požadavky na jednotlivé subsystémy – od oblasti napájení, přes zabezpečovací zařízení, až po samotná drážní vozidla. Důraz je v textu kladen zvláště na vzájemné vazby a interakce mezi jednotlivými subsystémy, a to zejména se zaměřením na jejich vztah ke komponentům vysokého napětí na vozidle. Samostatně byla zmíněna i velmi aktuální problematika kompatibility trakčních a zabezpečovacích zařízení.

Z těchto i dalších požadavků pak následně vychází i samotné těžiště a hlavní přínos práce, tedy prezentace koncepčního řešení a návrh komponent přívodu proudu elektrické jednotky. Pro studii byla zvolena dvousystémová třívozová jednotka, určená pro provoz na obou u nás nejvíce používaných napájecích systémech, tedy 3 kV DC a 25 kV; 50 Hz AC. Vzhledem k plánovanému přechodu na jednotnou proudovou soustavu o síťovém kmitočtu a postupném ústupu od klasických souprav, složených z lokomotivy a jednotlivých vozů, jsou už dnes obdobná vozidla široce poptávána jednotlivými dopravci, a i jejich obliba do budoucna, spolu s nutností nahradit vozidla dosluhující, jistě poroste.

V souladu se současnými trendy v železniční dopravě bylo pro koncepční návrh uvažováno plně nízkopodlažní vozidlo s úrovní podlahy ve výšce 600 mm nad temenem kolejnice, umožňující bezbariérový nástup z nástupišť o standardizované výšce 550 mm. Plná bezbariérovost jednotky s sebou však přináší i některé technické výzvy, které musela práce řešit. Například téměř veškeré komponenty silového rozvodu, a to včetně síťového transformátoru nebo čtyřkvadrantového měniče, je nutné kvůli nedostatku prostoru umístit na střeše jednotky, a nikoli ve strojovně či pod vozidlem, jako je tomu kupříkladu u lokomotiv a souprav s výše položenou podlahou.

Vzniká tak nutnost poměrně pečlivé prostorové koordinace vysokonapěťových komponent s dalšími zařízeními jako jsou chladicí jednotky pro transformátor a výkonové měniče, klimatizační jednotky apod. Vše je přitom třeba uvažovat s důrazem na spolehlivost provozu i bezpečnost cestujících. Celkové prostorové uspořádání proto musí zaručit nezbytnou izolační vzdálenost i dodržení minimálních vzdušných odstupů a nejkratších délek povrchových cest, bránících přeskočení vysokého napětí na okolní objekty.

Výhodou ucelených jednotek, částečně kompenzující omezené prostorové možnosti v rámci vozidla, je možnost rozmístit vysokonapěťové komponenty mezi jednotlivé vozy tak, aby se docílilo lepšího využití střešního prostoru a zároveň se dosáhlo přibližně podobné váhy jednotlivých částí jednotky. Přináší to s sebou však nutnost řešit vysokonapěťový rozvod v rámci jednotlivých vozů i v místech přechodu mezi nimi.

Právě rozvodu vysokého napětí a pochopitelně i návrhu a základnímu dimenzování samotných komponent byla věnována další část práce. Oddíl obsahuje jednak aspekty, jež je nutné vzít pro správný návrh jednotlivých prvků v úvahu, a dále na základě analýzy katalogových listů výrobců drážní techniky pro ilustraci rovněž uvádí i možný příklad výběru

konkrétní součástky. Důraz byl kladen i na současné vysvětlení a zdůvodnění nutnosti rozdílného přístupu ke konstrukci součástek stejnosměrné a střídavé části rozvodu.

Jako proudový sběrač byl v práci navržen u střídavého systému jednoramenný, pneumaticky ovládaný pantograf. Díky nižším protékajícím proudům je možné použít čisté uhlíkové lišty, které způsobují menší opotřebenění trolejového vodiče. Naopak na síti stejnosměrné je důležitá především dobrá vodivost sběrací lišty, proto je v tomto případě užívána uhlíková lišta sycená mědí, která je však zároveň více abrazivní vůči trolejovému vodiči.

Rovněž hlavní vypínač má u obou systémů naprosto odlišnou konstrukci a princip činnosti. U střídavého systému práce počítá, vzhledem k příznivému poměru hmotnosti a rozměrů, s použitím vakuového vypínače. Během procesu vypínání je oblouk zhasen při přirozeném průchodu proudu nulou, zároveň dochází i k rychlému elektrickému zotavení spínací komory a oblouk už se znovu neobnoví. Naproti tomu u stejnosměrné trakce se používají proud omezující kontejnerové rychlovypínače, vybavené zhasací komorou. Jedná se o spínací prvky, u nichž se vytvořený oblouk ve zhasací komoře rozdělí na celou řadu oblouků menších (anodový a katodový spád se mnohonásobí) a zároveň dojde k jejich prodloužení magnetickými póly nebo termickým působením. Tím se zvýší napětí na oblouku nad napětí síťové a vypínání proud klesne k nule.

Nedílnou součástí vysokonapětového rozvodu jsou dále i svodiče přepětí. Pro obě proudové soustavy je uvažováno použití varistorů (tj. napětově závislých odporů), dimenzovaných na odpovídající napětovou hladinu. Jedná se o součástky s extrémně nelineární volt-ampérovou charakteristikou, které se od určitého napětí stávají vodivými a umožňují svést poruchový proud mimo chráněné zařízení.

V neposlední řadě se práce věnuje i dimenzování vysokonapětových kabelů. Navržený kabelový průřez byl ověřen na účinky provozních i zkratových proudů. Kontrolovány byly i napětové úbytky a do úvahy vzaty mechanické a provozní vlastnosti týkající se podmínek jejich instalace na vozidle. Prostor byl v textu také věnován popisu a výběru měřících transformátorů proudu a napětí i dalších komponent rozvodu, jako jsou odpojovače, kabelové koncovky a konektory či kabelové spirály mezivozových přechodů.

Kromě koncepčního řešení a návrhu komponent přívodu proudu byl na závěr práce čtenář krátce seznámen i s problematikou vedení zpětného proudu a konceptem ochranného uzemnění pro případ zkratu na vozidle. Jde o tematiku, jejíž obsáhlejší popis by si žádal samostatné studium a k níž doposud existuje pouze relativně málo ucelených podkladů. Obdobná situace se však týká prakticky celé oblasti napájení drážních vozidel. Protože se však jedná o problematiku natolik komplexní, složitou, a navíc neustále se vyvíjející, je pravděpodobně nemyslitelné ji obsáhnout do jedné publikace. Přesto si práce kladla za cíl poskytnout čtenáři alespoň určitou představu o specifikách drážního systému a následně na praktickém návrhu ilustrovat problémy a výzvy, které musí projektanti kolejových vozidel řešit. Věřím, že se přinejmenším toto podařilo v maximální možné míře naplnit.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

a) Knihy a brožury

- [1] STEIMEL, Andreas. *Electric Traction – Motive Power and Energy Supply: Basics and Practical Experience*. 2. dopl. vyd. München: Deutscher Industrieverlag, 2014, 416 s. ISBN 978-3835672574.
- [2] FEJT, Jiří a Jiří, RYDLO. *Střídavá trakce*. 1. vyd. Praha: NADAS, 1969, 288 s. ISBN nepřiděleno
- [3] DOLEČEK, Radovan a Ondřej ČERNÝ. *Trakční napájecí soustavy: studijní opora*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2015. ISBN 978-80-7395-879-4.
- [4] PEROUTKA, Jaroslav a Petr LAPÁČEK. Jednotná napájecí soustava v Česku? *SUDOP revue*. 2016, **2016**(4), s. 22-23.
- [5] OGUNSOLA, Ade a Andrea, MARISCOTTI. *Electromagnetic compatibility in railways: analysis and management*. Berlin: Springer Verlag, 2013, 527 s. ISBN 978-3-642-30280-0.
- [6] ABAD, Gonzalo. *Power electronics and electric drives for traction applications*. Pondicherry: Wiley, 2017. ISBN 978-111-8954-423.

b) Normy a předpisy

- [7] Zákon č. 266/1994 Sb., o drahách, ve znění pozdějších předpisů. In: Sbíрка zákonů. 14. 12. 1994. ISSN 1211-1244. Dostupné také z: <https://portal.gov.cz/app/zakony/download?idBiblio=42341&nr=266~2F1994~20Sb.&ft=pdf>
- [8] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2008/57/ES ze dne 17. června 2008, o interoperabilitě železničního systému ve Společenství (přepřacované znění). Dostupné z: <http://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/57/oj>
- [9] Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2016/797 ze dne 11. května 2016, o interoperabilitě železničního systému v Evropské unii. Dostupné také z: <http://data.europa.eu/eli/dir/2016/797/oj>
- [10] Nařízení Komise (EU) č. 1301/2014 ze dne 18. listopadu 2014, o technické specifikaci pro interoperabilitu subsystému energie železničního systému v Unii. Dostupné také z: <http://data.europa.eu/eli/reg/2014/1301/oj>
- [11] ČSN EN 50 163 ed. 2: Drážní zařízení – Napájecí napětí trakčních soustav. Praha: ČNI, 2005.
- [12] ČSN EN 50 124-2: Drážní zařízení – Koordinace izolace – Část 2: Přepětí a ochrana před přepětím. Praha: ČNI, 2002.

- [13] ČSN EN 50 388 ed. 2: Drážní zařízení – Napájení a drážní vozidla – Technická kritéria pro koordinaci mezi napájením (napájecí stanicí) a drážními vozidly pro dosažení interoperability. Praha: ÚNMZ, 2013.
- [14] ČSN EN 50 367 ed. 2: Drážní zařízení – Systémy sběračů proudu – Technická kritéria pro interakci mezi pantografovým sběračem a trolejovým vedením (pro dosažení volného přístupu). Praha: ÚNMZ, 2013.
- [15] ČSN EN 50 119 ed. 2: Drážní zařízení – Pevná trakční zařízení – Trolejová vedení pro elektrickou trakci. Praha: ÚNMZ, 2010.
- [16] ČSN EN 50 149 ed. 2: Drážní zařízení – Pevná drážní zařízení – Elektrická trakce – Profilový trolejový vodič z mědi a slitin mědi. Praha: ÚNMZ, 2013.
- [17] ČSN EN 50 463-2: Drážní zařízení – Energetické měření na palubě vlaku – Část 2: Měření energie. Praha: ÚNMZ, 2013.
- [18] ČSN EN 50 122-1 ed.2: Drážní zařízení – Pevná trakční zařízení – Elektrická bezpečnost, uzemňování a zpětný obvod – Část 1: Ochranná opatření proti úrazu elektrickým proudem. Praha: ÚNMZ, 2011.
- [19] Nařízení Komise (EU) č. 2016/919 ze dne 27. května 2016 o technické specifikaci pro interoperabilitu týkající se subsystémů „Řízení a zabezpečení“ železničního systému v Evropské unii. Dostupné také z: <http://data.europa.eu/eli/reg/2016/919/oj>
- [20] ČSN 34 2613 ed. 3: Železniční zabezpečovací zařízení – Kolejové obvody a vnější podmínky pro jejich činnost. Praha: ÚNMZ, 2014.
- [21] ČSN EN 50 617-1: Drážní zařízení – Základní parametry systémů detekování vlaků pro interoperabilitu evropských železničních systémů – Část 1: Kolejové obvody. Praha: ÚNMZ, 2017.
- [22] ČSN CLC/TS 50 238-3: Drážní zařízení – Kompatibilita mezi drážním vozidlem a systémy pro detekování vlaků – Část 3: Kompatibilita s počítači náprav. Praha: ÚNMZ, 2014.
- [23] ČSN EN 15 380-2: Železniční aplikace – Systém označování kolejových vozidel – Část 2: Výrobní skupiny. Praha: ČNI, 2006.
- [24] Nařízení Komise (EU) č. 1302/2014 ze dne 18. listopadu 2014 o technické specifikaci pro interoperabilitu subsystému kolejová vozidla – lokomotivy a kolejová vozidla pro přepravu osob železničního systému v Evropské unii. Dostupné také z: <http://data.europa.eu/eli/reg/2014/1302/oj>
- [25] ČSN EN 50 206-1 ed.2: Drážní zařízení – Kolejová vozidla – Pantografové sběrače: Vlastnosti a zkoušky – Část 1: Pantografové sběrače proudu vozidel pro tratě celostátní. Praha: ÚNMZ, 2011.
- [26] ČSN EN 60 077-4: Drážní zařízení – Elektrická zařízení drážních vozidel – Část 4: Elektrotechnické součástky – Pravidla pro vypínače AC. Praha: ČNI, 2003.

- [27] ČSN EN 60 099-4 ed.3: Svodiče přepětí – Část 4: Omezovače přepětí bez jiskřišť pro sítě střídavého napětí. Praha: ÚNMZ, 2015.
- [28] ČSN EN 61 869-3: Přístrojové transformátory – Část 3: Dodatečné požadavky pro induktivní transformátory napětí. Praha: ÚNMZ, 2012.
- [29] ČSN EN 61 869-2: Přístrojové transformátory – Část 2: Dodatečné požadavky na transformátory proudu. Praha: ÚNMZ, 2013.
- [30] ČSN EN 50 343 ed.2: Drážní zařízení – Drážní vozidla – Pravidla pro instalace kabelů. Praha: ÚNMZ, 2015.
- [31] ČSN EN 33 2000-5-54 ed.3: Elektrické instalace nízkého napětí – Část 5-54: Výběr a stavba elektrických zařízení – Uzemnění a ochranné vodiče. Praha: ÚNMZ, 2012.
- [32] ČSN EN 60 077-3: Drážní zařízení – Elektrická zařízení drážních vozidel – Část 3: Elektrotechnické součástky – Pravidla pro vypínače DC. Praha: ČNI, 2003.
- [33] ČSN EN 50 526-1: Drážní zařízení – Pevná trakční zařízení – DC svodiče přepětí a zařízení omezující napětí – Část 1: Svodiče přepětí. Praha: ÚNMZ, 2012.
- [34] ČSN EN 60 044-7: Přístrojové transformátory – Část 7: Elektronické transformátory napětí. Praha: ČNI, 2001.
- [35] ČSN EN 60 044-8: Přístrojové transformátory – Část 8: Elektronické transformátory proudu. Praha: ČNI, 2001.
- [36] ČSN EN 50 124-1: Drážní zařízení – Koordinace izolace – Část 1: Základní požadavky – Vzdušné vzdálenosti a povrchové cesty pro všechna elektrická a elektronická zařízení. Praha: ČNI, 2002.
- [37] ČSN EN 50 153 ed.3: Drážní zařízení – Drážní vozidla – Opatření na ochranu před úrazem elektrickým proudem. Praha: ÚNMZ, 2015.

c) Webové stránky a katalogy

- [38] BINKO, Marek. *Jednotná trakční soustava na síti SŽDC* [online]. Praha: Správa železniční dopravní cesty, 2014 [cit. 2016-11-10]. Dostupné z: <http://www.szdc.cz/studenti/files/ckfiles/file/2014-6b.pdf>
- [39] Podnikové materiály SIEMENS s.r.o., Praha.
- [40] Trainguard – Full interoperability for rail traffic [online]. Berlin: Siemens, 2014 [cit. 2017-02-05]. Dostupné z: <http://www.mobility.siemens.com/mobility/global/SiteCollectionDocuments/en/rail-solutions/rail-automation/train-control-systems/trainguard-en.pdf>
- [41] ERTMS - Subsystems and Constituents of the ERTMS [online]. [cit. 2017-02-05]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/transport/modes/rail/ertms/what-is-ertms/subsystems_and_constituents_of_the_ertms_en

- [42] Covering the distance with SKF Axletronic odometers [online]. [cit. 2017-02-05]. Dostupné z: <http://evolution.skf.com/covering-the-distance-with-skf-axletronic-odometers/>
- [43] European Train Control System (ETCS) [online]. Berlin: Siemens, 2014 [cit. 2017-02-07]. Dostupné z: <http://www.mobility.siemens.com/mobility/global/en/interurban-mobility/rail-solutions/rail-automation/train-control-system/european-train-protection-system/pages/european-train-control-system.aspx>
- [44] BINKO, Marek. *Železniční infrastruktura pro konkurenceschopná vozidla* [online]. Praha: Správa železniční dopravní cesty, 2014 [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: <http://www.szdc.cz/studenti/files/ckfiles/file/2014-7.pdf>
- [45] Systémy pro kolejovou dopravu: Stykový transformátor DT 075 E [online]. Praha: AŽD [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <https://www.azd.cz/admin/files/Dokumenty/pdf/Produkty/Kolejove/35-DT-075-E.pdf>
- [46] CHUDÁČEK, Václav, Ivan KONEČNÝ a Karel STOLL. *Problémy elektrické kompatibility kolejových obvodů* [online]. Praha: Vědecko-technický sborník ČD, 2002, 25 s. [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <https://vts.cd.cz/documents/51448/51679/1407.pdf/722d9189-e97d-41e2-a5ff-5bf09c6e4520>
- [47] Traffic Infrastructure: Frauscher Sensortechnik GmbH [online]. [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://www.advantageaustria.org/international/company/frauscher-sensortechnik-gmbh.profile.en.html>
- [48] Siemens Desiro Train Platform [online]. Berlin: Siemens, 2014. [cit. 2017-04-13]. Dostupné z: <https://www.mobility.siemens.com/mobility/global/en/urban-mobility/rail-solutions/commuter-and-regional-trains/desiro/pages/desiro.aspx>
- [49] Stemmann Technik, Roof-mounted pantographs and their parameters [online]. [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: http://www.stemmann.com/en/products/roof_mounted_pantographs
- [50] Richard Murgenthal, Produkte – Hauptschalter, Technische Daten [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://richardag.ch/hauptschalter.shtml>
- [51] Surge arresters for railway applications [online]. Erlangen: Siemens, 2014. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: siemens.com/energy/arrester
- [52] Katalogový list výrobce RITZ Instrument Transformers. RITZ Instrument Transformers, 2013.
- [53] Katalogový list kabelu TENAX-TRAIN-Plus. Draka kabely, 2015.
- [54] Produktový manuál: Stejnoseměrné rychlovyvínače pro kolejová vozidla. Sécheron, 2015.

- [55] Katalogový list přístrojového transformátoru *DV 4200/SP4*. LEM, 2016 [online].
[cit. 2017-04-25]. Dostupné z: http://www.lem.com/docs/products/dv_4200_sp4.pdf
- [56] Katalogový list přístrojového transformátoru *LTC 1000-S*. LEM, 2016 [online].
[cit. 2017-04-25]. Dostupné z: http://www.lem.com/docs/products/ltc_1000-s.pdf
- [57] Katalogový list kabelu *RADOX 9 GKW-AX*. Huber+Suhner, 2017 [online].
[cit. 2017-04-30]. Dostupné z: <http://www.hubersuhner.com/ProdDet/36>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1	Zastoupení jednotlivých železničních napájecích soustav ve světě (stav k roku 2003), údaje převzaté z [1].....	9
Obr. 1.2	Dřívější a současná hierarchie jednotlivých předpisů v železniční dopravě.....	11
Obr. 1.3	Rozdělení železničního systému na jednotlivé strukturální subsystémy podle směrnice TSI.....	12
Obr. 2.1	Napájecí soustavy v Evropě, data převzatá z [1].....	14
Obr. 2.2	Principiální schéma napájení jednofázové trakce 25 kV; 50 Hz zapojením transformátorů do otevřeného trojúhelníku, tzv. do „V“ [2].....	16
Obr. 2.3	Navržený časový harmonogram přechodu na jednotnou napájecí soustavu 25 kV; 50 Hz [4].....	18
Obr. 2.4	Maximální hodnota napětí U podle doby trvání [12].....	20
Obr. 2.5	Přípustný účinník v závislosti na vlakem odebíraném činném a jalovém výkonu, údaje převzaté z [13].....	22
Obr. 2.6	Znázornění klikatosti vedení v oblouku a v přímé trati.....	24
Obr. 2.7	Princip systému měření energie (EMS) na palubě vozidla a v pozemní stanici.....	27
Obr. 2.8	Naznačení principu ochrany neživých částí ve stejnosměrných soustavách ukolejněním přes průrazku.....	29
Obr. 3.1	Balízová skupina tvořená dvěma Eurobalise (vlevo) a kabel smyčky Euroloop umístěný v patě kolejnice (vpravo) [40].....	32
Obr. 3.2	Příklad provedení kontaktního odometru na nápravě vozidla od výrobce SKF [42].....	34
Obr. 3.3	Princip fungování systému ETCS Level 1, podklad převzatý z [43].....	35
Obr. 3.4	Princip fungování systému ETCS Level 2 a Level 3, podklad převzatý z [43].....	36
Obr. 3.5	Plán postupného zavádění ETCS L2 v ČR [44].....	37
Obr. 3.6	Paralelní kolejový obvod se stykovým transformátorem, vlevo pak samotný stykový transformátor, podklad převzatý z [45].....	39
Obr. 3.7	Příklad provedení počítače náprav od výrobce Frauscher GmbH. [47].....	43
Obr. 5.1	Příklad moderní elektrické jednotky pro příměstskou regionální dopravu typu Desiro ML z produkce firmy Siemens [48].....	46
Obr. 5.2	Prostorová dispozice a rozložení komponentů na střeše navrhované elektrické jednotky.....	48

Obr. 6.1	Omezení odběru trakčního proudu v závislosti na napětí v síti, podklad převzatý z [13].....	52
Obr. 6.2	Znázornění skutečného provedení omezení odběru trakčního proudu a příkonu v závislosti na napětí v síti.....	52
Obr. 6.3	Obvyklá účinnost jednotlivých komponent v silovém rozvodu vozidla.....	54
Obr. 6.4	Sběrač střídavého systému od výrobce Stemmann Technik [49].....	56
Obr. 6.5	Hlavní vypínač s uzemňovacím odpojovačem od výrobce RICHARD Murgenthal [50].....	58
Obr. 6.6	Svodič přepětí od výrobce Siemens [51].....	60
Obr. 6.7	Měřicí transformátor napětí (vlevo) a měřicí transformátor proudu (vpravo) [52].....	62
Obr. 6.8	Silový kabel TENAX-TRAIN-Plus od výrobce Draka [53].....	64
Obr. 6.9	Příklad kabelové koncovky (vlevo), konektoru (uprostřed) a spirály pro mezivozový přechod (vpravo) [53].....	68
Obr. 6.10	Hlavní vypínač se zhasení komorou (vlevo) a montážní kontejner (vpravo) [54].....	72
Obr. 6.11	Příklad zemního odpojovače výrobce Sécheron (vlevo) a odpojovače výrobce RICHARD Murgenthal (vpravo) [50] [54].....	72
Obr. 6.12	Měřicí transformátor napětí (vlevo) a měřicí transformátor proudu (vpravo) pro stejnosměrnou soustavu [55] [56].....	74
Obr. 6.13	Vymezení střešního prostoru pro umístění vysokonapěťových komponent, podklad převzatý z [39].....	79
Obr. 6.14	Prostorové uspořádání komponent střídavého rozvodu v oblasti pantografového sběrače.....	80
Obr. 6.15	Prostorové uspořádání komponent stejnosměrného rozvodu v oblasti pantografového sběrače.....	81
Obr. 6.16	Celkové schéma silnoproudého rozvodu navrhované elektrické jednotky..	82
Obr. 7.1	Nápravový sběrač od výrobce Stemmann Technik [49].....	83
Obr. 7.2	Schéma řešení komponent zpětného proudu na podvozku.....	84

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1	Charakteristiky hlavních používaných napájecích soustav, údaje převzaty z [11].....	19
Tab. 2.2	Maximální poruchový proud při zkratu mezi trakčním vedením a kolejnicí, údaje převzaty z [13].....	23
Tab. 2.3	Minimální požadavky na jakost odběru proudu, údaje převzaty z [14].....	26
Tab. 3.1	Ochranná kmitočtová pásma pro kolejové obvody, údaje převzaty z [20]..	41
Tab. 5.1	Dělení projektu na jednotlivé funkční skupiny, údaje převzaty z [23].....	45
Tab. 5.2	Dělení funkční skupiny F (napájecí obvody, pohon) na podskupiny, údaje převzaty z [23].....	45
Tab. 5.3	Technické parametry uvažované jednotky pro příměstskou regionální dopravu.....	47
Tab. 6.1	Technické parametry uvažovaného sběrače pro střídavý systém [49].....	55
Tab. 6.2	Technické parametry uvažovaného hlavního vypínače pro střídavý systém [50].....	57
Tab. 6.3	Technické parametry uvažovaného svodiče přepětí pro střídavý systém [51].....	59
Tab. 6.4	Technické parametry uvažovaného měřícího transformátoru napětí [52]...	61
Tab. 6.5	Technické parametry uvažovaného měřícího transformátoru proudu [52]..	62
Tab. 6.6	Technické parametry uvažovaného kabelu pro rozvod střídavého proudu [53].....	63
Tab. 6.7	Technické parametry uvažovaného sběrače pro stejnosměrný systém [49].....	70
Tab. 6.8	Technické parametry uvažovaného hlavního vypínače pro stejnosměrný systém [54].....	71
Tab. 6.9	Technické parametry uvažovaného svodiče přepětí pro stejnosměrný systém [51].....	73
Tab. 6.10	Technické parametry uvažovaného měřícího transformátoru napětí pro stejnosměrnou soustavu [55].....	74
Tab. 6.11	Technické parametry uvažovaného měřícího transformátoru proudu pro stejnosměrnou soustavu [56].....	74
Tab. 6.12	Technické parametry uvažovaného kabelu pro rozvod stejnosměrného proudu [57].....	75
Tab. 6.13	Minimální hodnoty vzdušných vzdáleností a délek povrchových cest [36]....	78

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	Popis
AC.....	Střídavá síť (obecně)
ADD.....	Automatic Dropping Device
BTM.....	Balise Transmission Module
CCS.....	Control-Command and Signalling
COTIF.....	Convention relative au Trafic International Ferroviaire
CR.....	Conventional Railway
ČD.....	České dráhy
ČKD.....	Českomoravská Kolben Daněk
ČR.....	Česká republika
ČSN.....	Česká technická norma
DC.....	Stejnoseměrná síť (obecně)
DCS.....	Data Collection Server
DHS.....	Data Handling Systém
DMI.....	Driver Machine Interface
EMF.....	Energy measurement function
EMS.....	Energy Measurement Systém
EN.....	Evropská norma
ENE.....	Energy
ERTMS.....	European Rail Traffic Management System
ETCS.....	European Train Control System
EU.....	Evropská unie
EVC.....	European Vital Computer
GPS.....	Global Positioning System
GSM-R.....	Global System for Mobile Communications – Railway
HS.....	High Speed
INF.....	Infrastructure
JRU.....	Juridical Recorder Unit
LEU.....	Lineside Electronic Unit
MA.....	Movement Authority

MAI.....	Maintenance
nn.....	nízké napětí
OPE.....	Operation and traffic management
OZ.....	Opětné zapnutí
RBC.....	Radio Block Center
RIC.....	Regolamento Internazionale Carrozze
RINF.....	Register of Infrastructure
RIV.....	Regolamento Internazionale Veicoli
RST.....	Rolling Stock
STM.....	Specific Transmission Module
TAF.....	Telematics Applications for Freight service
TAP.....	Telematics Applications for Passenger service
TIU.....	Train Interface Unit
TRS.....	Trat'ový Rádiový Systém
TSI.....	Technical Specifications for Interoperability
UIC.....	Union Internationale des Chemins de fer
vn.....	vysoké napětí
vvn.....	velmi vysoké napětí

Symbol

Popis

a.....	Činitel pro danou napájecí soustavu dle ČSN EN 50 388 [-]
c_v	Objemová tepelná kapacita materiálu [$J \cdot ^\circ C^{-1} \cdot m^{-3}$]
$\cos\varphi_{\min}$	Nejnižší přípustná hodnota účinníku dle ČSN 50 388 [-]
F_m	Střední přítláčná síla [N]
f_{\max}	Nejvyšší dovolená frekvence sítě [Hz]
f_{\min}	Nejnižší dovolená frekvence sítě [Hz]
f_n	Jmenovitá frekvence sítě [Hz]
I_c	Zatěžovací (výpočtový) proud [A]
I_c	Činná složka proudu [A]
I_{cable}	Maximální proudové zatížení kabelu udané výrobcem pro definovanou teplotu okolí [A]
I_{corr}	Korigované maximální proudové zatížení kabelu [A]
I_{cs}	Zatěžovací (výpočtový) proud stojícího vlaku [A]

I_j	Jalová složka proudu [A]
I_{ke}	Efektivní hodnota předpokládaného poruchového proudu, též ekvivalentní zkratový proud [A]
k	Korekční faktor závisející na materiálových vlastnostech kabelu a počátečních a koncových teplotách [$A \cdot s^{0.5} \cdot m^{-2}$]
k_1	Korekční faktor pro předpokládanou teplotu okolí [–]
k_2	Korekční faktor pro způsob instalace [–]
k_3	Korekční faktor předpokládané životnosti kabelu [–]
k_4	Korekční faktor zohledňující případný krátkodobý provoz [–]
k_5	Korekční faktor, zohledňující počet žil v kabelu [–]
l	Délka kabelu [km]
L_k	Měrná indukčnost kabelu [$H \cdot km^{-1}$]
P_{AUX}	Celkový příkon vedlejší spotřeby [W]
P_c	Celkový příkon jednotky [W]
P_T	Celkový trakční výkon [W]
Q	Jalový výkon vozidla [VAr]
Q_{pr}	Teplo vzniklé průchodem proudu [J]
Q_{aku}	Teplo ve vodiči akumulované [J]
R	Odpor kabelu [Ω]
R_k	Měrný odpor kabelu přepočtený na nejvyšší provozní teplotu [$\Omega \cdot km^{-1}$]
R_g	Měrný odpor kabelu pro danou teplotu [$\Omega \cdot km^{-1}$]
S_{cable}	Ověřovaný průřez kabelu [m^2]
S_{min}	Minimální vyhovující průřez kabelu [m^2]
$T_{c(max)}$	Maximální teplota jádra, jejíž dodržení umožňuje dosažení předpokládané životnosti kabelu [$^{\circ}C$]
t_k	Doba průchodu zkratového proudu [s]
$T_{o(max)}$	Maximální předpokládaná teplota okolí, pro kterou je provoz vlaku navržen [$^{\circ}C$]
T_{ref}	Referenční teplota okolí, pro kterou platí hodnota I_{cable} [$^{\circ}C$]
ΔU_f	Napěťový úbytek na kabelu [V]
$U_{impulzni}$	Maximální hodnota impulzního napětí [V]
U_{max1}	Nejvyšší trvalé napětí sítě [V]
U_{max2}	Nejvyšší krátkodobé napětí sítě [V]
U_{max3}	Nejvyšší dlouhodobé přepětí [V]

$U_{\min 1}$	Nejnižší trvalé napětí sítě [V]
$U_{\min 2}$	Nejnižší krátkodobé napětí sítě [V]
U_n	Jmenovité napětí sítě [V]
v	Rychlost [$\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$]
V	Objem vodiče [m^3]
X	Reaktance kabelu [Ω]
α_{Cu}	Teplotní součinitel mědi [K^{-1}]
β	Reciproká hodnota teplotního součinitele rezistivity pro vodič daného materiálu při 0 °C [$^{\circ}\text{C}$]
ρ_{20}	Elektrická rezistivita materiálu vodiče při 20 °C [$\Omega\cdot\text{m}$]
σ_m	Maximální směrodatná odchylka přitlačné síly [N]
η_{ASM}	Účinnost asynchronního motoru [–]
η_c	Souhrnná účinnost trakčních zařízení na vozidle [–]
η_m	Účinnost měniče trakčních pohonů [–]
η_p	Účinnost převodovky v podvozku [–]
η_T	Účinnost trakčního transformátoru [–]
$\eta_{4\text{QS}}$	Účinnost čtyř-kvadrantového měniče [–]
ϑ	Teplota [$^{\circ}\text{C}$]
ϑ_1	Počáteční teplota vodiče [$^{\circ}\text{C}$]
ϑ_k	Konečná teplota vodiče [$^{\circ}\text{C}$]

Pozn.: Dolní index (AC) značí hodnotu pro střídavou soustavu, index (DC) pro stejnosměrnou