



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta elektrotechnická  
K13115 – Katedra elektroenergetiky**

---

**Analýza zpětné cesty elektrického napájení  
železničního trakčního vozidla**

**Diplomová práce**

**Bc. Pavel Skála**

**Praha 2017**



**CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE**

**Fakulty of Electrical Engineering**

**K13115 – Department of Electroenergetics**

---

**An analysis of the return path of the power  
supply for the railway traction vehicle**

**Masters' thesis**

**Bc. Pavel Skála**

**Prague 2017**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Skála** Jméno: **Pavel** Osobní číslo: **406160**  
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:

**Analýza zpětné cesty elektrického napájení železničního trakčního vozidla**

Název diplomové práce anglicky:

**An analysis of the return path of the power supply for the railway traction vehicle**

Pokyny pro vypracování:

1. Systémy elektrického napájení železnic, technické a standardizační požadavky
2. Vedení zpětných trakčních proudů na straně dopravní cesty
3. Vedení zpětných trakčních proudů na straně vozidla
4. Vznik a důsledky podélných zpětných proudů tekoucích přes vozidla
5. Matematický model elektrického obvodu podélných zpětných proudů
6. Simulace zpětných podélných proudů

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, 418 s. ISBN 978-3835672574
- [2] Fejt Jiří, Rydlo Jiří: Střídavá trakce 1. vydání Praha Nadas, 1969, 288 s. ISBN nepředěleno.
- [3] Doleček Radovan, Černý Ondřej: Trakční napájecí soustavy, Studijní opora PardubiceUP 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 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 druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **09.02.2017** Termín odevzdání diplomové práce: **26.05.2017**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2018**

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



## **Poděkování**

Děkuji panu prof. Ing. Josefu Tlustému, CSc. za vedení mé diplomové práce a za pomoc při jejím vytváření. Dále bych chtěl poděkovat pánům ze společnosti Siemens, s.r.o. za odbornou pomoc. V neposlední řadě chci poděkovat své rodině, která mi byla podporou v těžkých chvílích.

## **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 23.5.2017

.....

Bc. Pavel Skála

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá problematikou analýzy cesty zpětného trakčního proudu železničního vozidla. Obsahem teoretické části je seznámení se systémy elektrického napájení železnic, cestou elektrického proudu vozem, mechanikou trakčního a kolejnicového vedení. V praktické části je podrobnější analýza vedení zpětného trakčního proudu a návrh rezistorového schéma vozu. V závěru práce je vytvořen model vlakové soupravy v programu Matlab Simulink R2016b.

### **Klíčová slova:**

Zpětný trakční proud, model, Velaro D, elektrický proud, nápravový sběrač, rezistor.

## **Abstract**

The masters' thesis deals with problems of the analysis reverse traction current of the railway vehicle. Theoretical part is about the train electrical power systems, electrical current in the train car, mechanics of traction and railway lines. In the practical part there is a more detailed analysis of the reverse traction current and the design of the car's resistors. At the end there is model of the train set in the Matlab Simulink R2016b software.

### **Key words:**

Reverse traction current, model, Velaro D, electrical current, ground contact, resistor.





<b>1. Úvod.....</b>	<b>7</b>
<b>2. Teoretická část.....</b>	<b>8</b>
<b>2.1 Elektrická trakce a výzbroj vozidel .....</b>	<b>8</b>
<b>2.2 Výroba elektrické energie pro napájení vlaků .....</b>	<b>9</b>
2.2.1 Soustava DC 3 kV .....	9
2.2.2 Soustava AC 15 kV, 16,7 Hz.....	11
2.2.3 Soustava AC 25 kV, 50 Hz .....	12
2.2.4 Soustava 2AC 25 kV, 50 Hz .....	14
2.2.5 Trakční napájecí stanice .....	15
2.2.6 Dělení trakčního vedení .....	16
2.2.7 Rekuperace .....	17
2.2.8 Úbytky napětí.....	18
<b>2.3 Cesta elektrického proudu vozem .....</b>	<b>20</b>
2.3.1 Sběrač elektrické energie .....	20
2.3.2 Nápravový sběrač proudu.....	23
<b>2.4 Mechanika trakčního vedení, kolejnice.....</b>	<b>25</b>
2.4.1 Kolejnice a kolejové obvody.....	25
2.4.2 Trolejový vodič.....	28
<b>2.5 Interoperabilita.....</b>	<b>30</b>
2.5.1 Požadavky na funkční a technické parametry .....	31
2.5.2 Provedení TSI.....	32
<b>3. Praktická část.....</b>	<b>33</b>
<b>3.1 Vedení zpětného trakčního proudu.....</b>	<b>33</b>
3.1.1 Rozdíly mezi AC a DC tratí .....	33
3.1.2 Střídavé AC systémy pro napájení elektrických tratí .....	35
3.1.3 Stejnoseměrné DC systémy pro napájení elektrických tratí .....	39
3.1.4 Aktivní a pasivní zpětný vodič .....	40
<b>3.2 Vysokorychlostní vlak.....</b>	<b>43</b>

3.2.1 Popis a schéma jednotlivých vozových rezistorů.....	46
3.2.2 Modifikované zapojení vozových rezistorů .....	49
3.2.3 Pracovní a ochranné uzemnění podvozku .....	50
<b>3.3 Simulace modelu.....</b>	<b>53</b>
3.3.1 Popis subsystémů.....	54
<b>3.4 Výsledky simulací .....</b>	<b>55</b>
3.4.1 Vozové propojení.....	55
3.4.2 Kolejnicové propojení.....	57
3.4.3 Nápravové sběrače.....	58
3.4.4 Výkonové dimenzování rezistoru $R_{skříň}$ .....	59
<b>Závěr .....</b>	<b>61</b>
<b>Seznam zdrojů.....</b>	<b>63</b>
<b>Zdroje .....</b>	<b>63</b>
<b>Seznam grafů .....</b>	<b>64</b>
<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>65</b>
<b>Seznam tabulek.....</b>	<b>66</b>
<b>Seznam vzorců.....</b>	<b>66</b>
<b>Seznam použitých zkratk .....</b>	<b>66</b>
<b>Přílohy.....</b>	<b>67</b>
<b>Část zapojení matematického modelu vlakové soupravy .....</b>	<b>67</b>

# 1. Úvod

Vlaková doprava je velmi častým prostředkem jak pro transport nákladu, tak pro přepravu osob. Traťová infrastruktura se rozšiřuje a provoz se zintenzivňuje. Není proto netradiční, když se na jedné trati pohybuje v určitých rozestupech několik vlaků. Pro intenzivní provoz je samozřejmě podstatné zajistit dostatečný napájecí výkon trakčního vedení, což ale není v dnešní době tak technicky složité. Je nutné si ale uvědomit, že se odebíraný proud každým napájeným vozem musí přes kolejnici uzavírat zpět do trakční měřírny a tím může ovlivňovat vlaky, které se za ním pohybují.

V této diplomové práci se zaměřím na problematiku vedení zpětného trakčního proudu. Teoretická část bude v úvodu zaměřena na trakční vedení, především na popis různých napájecích soustav trakčního vedení a s tím spojené výhody a nevýhody popisované koncepce. Dále se zaměřím na cestu elektrického proudu vozem, která začíná na trolejovém sběrači a končí nápravovým sběračem. Z důvodu mezinárodních spojů je velmi důležitým pojmem interoperabilita, která je úzce spjata s požadavky na mechaniku trakčního vedení a kolejnic.

Obsahem praktické části bude detailní zaměření na problematiku vedení zpětného trakčního proudu, společně s různými případy realizace. Hlavním bodem pak bude sestavení náhradního rezistorového schéma, které popisuje elektrické odpory vysokorychlostního vlaku. Pomocí rezistorového schématu pak budu v programu Matlab Simulink R2016b modelovat vysokorychlostní soupravu, která bude provozována na stejnosměrně napájené trati (nejkritičtější případ). V závěru práce vyhodnotím simulované průběhy zpětných trakčních proudů soupravou.

## 2. Teoretická část

### 2.1 Elektrická trakce a výzbroj vozidel

Moderní vlaky současné doby nevyužívají dodanou (popřípadě vyrobenou) elektrickou energii pouze na napájení hnacího soustrojí. Napájeny musí být i čím dál více elektrizované pomocné prvky vlaku, které byly dříve mechanicky ovládané. Mezi hlavní pomocné pohony bych zařadil motory kompresorů, čerpadel a ventilátorů. Ty jsou součástí klimatizačních jednotek a zajišťují dostatečnou cirkulaci vzduchu a teplotu ve voze. Klimatizované vozy jsou standardem nejen v rychlovlakových soupravách, ale i v nových meziměstských jednotkách. Bateriové, osvětlovací, informační, ovládací a jiné systémy se řadí mezi ostatní elektrická zařízení vlaku.

Hlavním prvkem elektrické výzbroje vozidel je elektrický pohon. Záleží však na druhu trakce, která je v daném případě aplikována. Z hlediska závislosti se dělí na:

- a) závislá elektrická trakce
- b) nezávislá elektrická trakce
- c) polozávislá elektrická trakce.

U závislé elektrické trakce je vozidlo napájeno pomocí sběrače, spojeného s trakčním vedením. Trakční vedení je napájeno přes trakční napájecí stanice z elektrizační soustavy. Tím pádem je vlak přímo závislý na dodávané elektrické energii a neumí si jí sám generovat. Systém je díky tomu jednoduchý, vůz je lehký, levný, ale i velmi výkonný. Měrný výkon může dosahovat až 80 kW/t. Hlavní nevýhodou je drahá elektrizace železnic, případně stavba nových vysokonapěťových vedení.

V místech, kde není možnost realizace napájecích vedení, se uplatňují nezávislé elektrické trakce. Pohon je napájen pomocí elektrické energie, která je generována nejčastěji dieslovým generátorem. Dieslový motor má konstantní krouticí moment a tím pádem není příliš vhodný pro přímý pohon kol. Z tohoto důvodu je použit elektrický pohon, který zajistí variabilní tažnou sílu pro rozjezd lokomotivy.

Vozidlo s nezávislou elektrickou trakcí je těžké, technicky složité a oproti předchozí technologii i málo výkonné. Pro svůj provoz však nepotřebuje napájecí infrastrukturu.

Kombinací předchozích trakcí je systém polozávislé trakce. Pro provoz se vozidlo napájí z vlastního zásobníku elektrické energie, který je následně dobíjen ze stacionární dobíjecí stanice. Podstatná nevýhoda vyvstává z nutnosti připojení vozu na dobíjecí systém a následné době dobíjení baterií. Po nabití se vozidlo stává nezávislé do doby vybití baterií. Pořizovací náklady vozu s polozávislou trakcí jsou vysoké. Je to kvůli speciálním akumulátorům, které musí vydržet časté dobíjení jak rekuperací, tak z nabíjecí stanice.

Zásadním kritériem pro výběr vhodného systému je délka a lokace tratě, na které bude vůz provozován. Pro krátké tratě, které by bylo obtížné elektrizovat, je nejvýhodnější nezávislý nebo polozávislý systém. Tímto výběrem docílíme nízkých fixních nákladů na výstavbu, ale vyšších variabilních nákladů na provoz. Na dlouhé dobře elektrizovatelné tratě je výhodnější vyšší počáteční investice do elektrizace dráhy a nasazení závislého systému. Následné variabilní náklady budou nižší. Druhým měřítkem je předpokládaná vytíženost tratě. Pro intenzivní provoz je výhodnější závislá trakce oproti nezávislé, která se uplatní na méně vytížených tratích. [1]

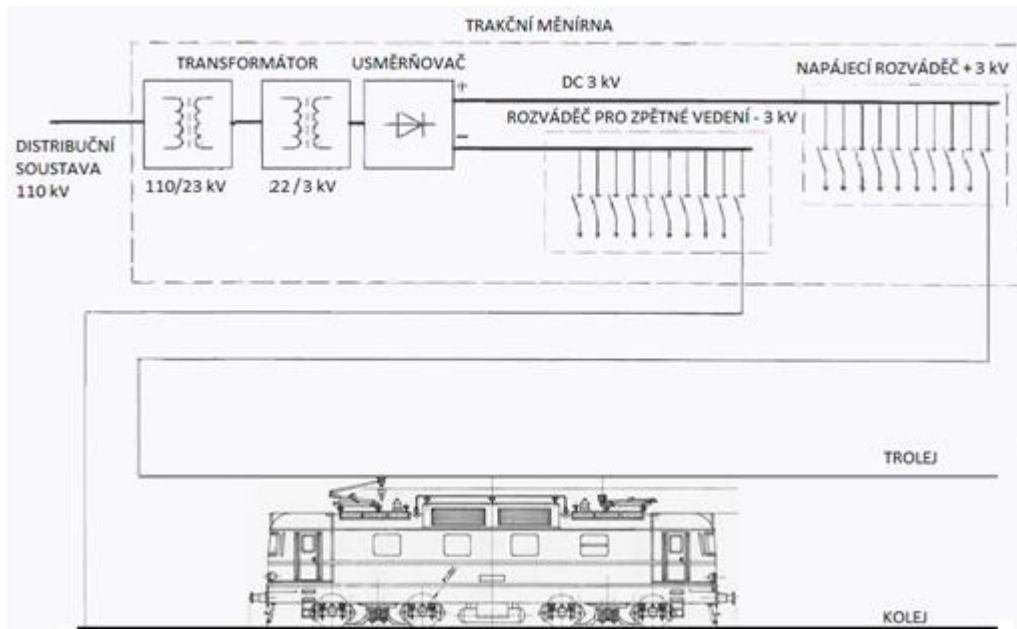
## **2.2 Výroba elektrické energie pro napájení vlaků**

Pro rychlovlaky jsou specifické požadavky na dodávky vysokých výkonů, a proto se řadí mezi závislou elektrickou trakci. V této kapitole se zaměřím na základní napěťové hladiny vlakových trolejí, a především na napěťovou hladinu 25 kV, 50 Hz. Ta je v dnešní době nejpreferovanější z důvodu dostatečné dodávky požadované energie.

### **2.2.1 Soustava DC 3 kV**

Stejnoseměrná soustava o napětí 3 kV patří v ČR mezi nejstarší. Stále je zavedena především v severní části země. Z důvodu nižší napěťové hladiny se toto vedení posuzuje jako těžké a je realizováno pro proudy řádu tisíců Ampér. Měděný trolejový drát má proto průřez 150 mm<sup>2</sup>, nosné lano 120 mm<sup>2</sup>. Trolejové vedení je napájeno pomocí trakčních měničů, připojených na distribuční soustavu 110 kV.

Mezi základní prvky trakční měřirny patří 3-fázové transformátory 110 kV / 23 kV, rozvodna vn, dvanáctipulzní usměrňovače, stejnosměrný rozváděč pro trolejové napájení (kladný pól), stejnosměrný rozváděč pro zpětné vedení kolejí, popř. zpětnými kabely (záporný pól), rozvody vlastní spotřeby, kontrolní a řídicí systémy. [1] [2]



Obrázek 1 - Schématické zapojení soustavy DC 3 kV, zdroj [2]

Charakteristickým znakem 3 kV soustavy je dvoustranné napájení. Jednotlivé úseky tratě o délce až 25 km jsou napájeny ze dvou napájecích stanic, umístěných na koncích trolejových úseků proti sobě. Protilehlé napájení vede jak ke zvýšení spolehlivosti napájení, tak k souměrnému rozložení zátěže na obě trakční měřirny.

Trolejové sběrače jsou z důvodu vysokých proudů konstruovány s masivními hlavicemi s přítlakem přibližně 100 N. Kontaktní plocha hlavice s trolejovým drátem je realizována měďnografitovou lištou.

#### Výhody

- možnost realizace dvoustranného napájení
- symetrické zatížení sítě

### Nevýhody

- v porovnání se střídavými systémy o vyšším napětí je tato soustava zatížena přenosem vyšších proudů a tím i vysokými úbytky na vedení = vysoké ztráty
- problémové vypínání stejnosměrného proudu a s tím spojené zhášení oblouku
- výskyt bludných proudů
- oproti AC systémům jsou měřírny řešeny komplikovaněji
- neschopnost rekuperace do distribuční soustavy
- vzdálenost trakčních měníren pouze 25 km [2]

V současné době je DC 3 kV systém na ústupu a při modernizaci tratí je tendence nahrazení novými, výkonnějšími AC systémy. Samozřejmě to s sebou přináší určité nemalé náklady. Popsaná teorie je stejná i u nejstarší napájecí hladiny DC 1,5 kV, která má jen kratší přeskokové vzdálenosti (menší izolátory).

### 2.2.2 Soustava AC 15 kV, 16,7 Hz

Konstrukce této nestandardní soustavy byla vyvolána potřebou napájet trakci vyšším napětím, které zaručovalo dostatečný výkon i ve větší vzdálenosti od napájecí stanice. Při testech se zjistilo, že standardní kmitočet 50 Hz byl krajně nevyhovující z důvodu špatné komutace stroje a tím způsobené vysoké poruchovosti (vysoké jiskření na komutátoru). Z tohoto důvodu se přistoupilo na frekvenci 16,7 Hz, při které je komutace dobře realizovatelná.

Změna kmitočtu byla realizována pomocí dvou metod:

- a) Elektrárenskou výrobou napětí již o frekvenci 16,7 Hz pomocí rotačních měničů, sestavených z šestipólového synchronního motoru a dvoupólového alternátoru. Elektrická energie o sníženém kmitočtu se následně musela transportovat za pomoci vlastních jednofázových linek.
- b) Transformací a změnou kmitočtu odběru elektrické energie z distribuční soustavy 3x110 kV, 50 Hz. Zde se používaly transformátory 110/22 kV a rotační, popř. polovodičové měřírny 50/16,7 Hz.

Snížený kmitočet s sebou přinesl i menší reaktanční úbytky trakčního vedení. Ty, spolu s vysokým napětím, snížily ztráty trolejovým vedením a zmenšily počet napájecích stanic.

Trolejové vedení, napájené z napájecí stanice je uprostřed rozděleno spínací stanicí, která je schopna v případě poruchy vedení rozdělit a napájet z jiné napájecí stanice. Plní také funkci příčného propojení trolejí (v obou směrech) a tím zmenšení úbytků napětí.

Popisovaná trakční soustava se i dnes hojně využívá. Potřeba takto napájet stejnosměrné motory již sice pominula, ale soustava je vybudována a stále funkční. Vysoce oceňovaná je i nižší reaktance trakčního vedení a s tím spojené nižší ztráty. Nejrozšířenější napěťová hladina je v Německu a Rakousku 15 kV, 16,7 Hz. V České republice je použita na dráze Znojmo – Šatov, která je napájena z Rakouska.

#### *Výhody*

- vyšší napěťová hladina a tím menší ztráty, menší průřez napájecího vodiče
- vzdálenost trakčních napájecích stanic až 60 km
- lehce realizovatelné dvoustranné napájení, nedochází ke změně fází
- nezávislost na přenosových, popř. distribučních linkách o frekvenci 50 Hz (var. a))
- jednoduchá rekuperace (dále viz kapitola Rekuperace)

#### *Nevýhody*

- stavba specifických linek, elektráren a frekvenčních měníren
- těžší magnetický obvod transformátorů [1] [2]

### **2.2.3 Soustava AC 25 kV, 50 Hz**

Rozvoj 25 kV napájecí soustavy se odvíjel od technických možností konstrukce polovodičových usměrňovačů. Ty, společně s transformátorem a stejnosměrným motorem, tvořily základní prvky lokomotivy. Velkou výhodou je možnost připojení na běžnou elektrizační soustavu s frekvencí 50 Hz. Vysoké napětí zaručuje dostatečný přenos výkonu. Proto je soustava vhodná pro napájení vozů s výkonem okolo jednotek MW. Oproti hladině DC 3 kV je realizována pro nižší proudy v řádu stovek Ampér. Měděné trolejové vedení je konstruováno s průřezem 100 mm<sup>2</sup>, nosné bronzové lano s průřezem 50 mm<sup>2</sup>. Kvůli vyrovnávacím proudům mezi trakčními transformátory není soustava napájena oboustranně. Z tohoto důvodu je síť tzv. paprskovitého typu.



Trakční měnič má pro každou kolej v obou směrech dva nezávislé vývody napětí. Systém je napájen pomocí třífázového transformátoru zapojeného do „V“. Prakticky to znamená, že je jedno vinutí zapojeno na trolej jedné strany tratě, druhé vinutí zapojeno na trolej druhé strany tratě a třetí vinutí není vyvedeno. Problém nastává s nesymetrickým zatěžováním sítě, takže v následujícím úseku tratě musí být nevyužitá vinutí zapojena místo jednoho z dříve již zapojených vinutí. Napájecí transformátor je na primární straně zapojen do trojúhelníka a na sekundární straně do hvězdy. Symetrické zatížení je možno realizovat i za pomoci balancéru, který je schopen směřovat proudy všech tří fází transformátoru tak, aby byly stejně velké.

Zmírnění důsledků je možno docílit vhodným prostřídáváním fází. V praxi to znamená, že trolejové vedení musí být souměrně rozděleno do jednofázově napájených úseků, kterými vlak během jízdy projíždí. V přejezdu mezi úseky musí být vlak zcela odpojen od napájecí linky pomocí staženého sběrače.

Vzrůst velikosti napájecího napětí z 15 kV na 25 kV je zapříčiněn kompenzací vyšších úbytků napětí. Trakční vedení má vyšší induktivní reaktanci  $z = 0,26 + j 0,45 \Omega/\text{km}$  oproti soustavě s frekvencí 16,7 Hz a tím i vyšší napěťové ztráty, které se kompenzují vyšším napětím. Další problém, který vytváří starší lokomotivy, je odebrání jalového výkonu a deformace napětí vlivem vyšších harmonických složek proudu. Z tohoto důvodu jsou nezbytné filtračně – kompenzační stanice. Ty fungují na principu dynamických kompenzátorů. Pro odstranění vyšších harmonických používají sériově řazené tlumivky a kondenzátory tvořící rezonanční obvod. [1] [2]

#### *Výhody*

- oproti soustavám s nižší napěťovou hladinou má menší ztráty
- napájecí stanice mohou být rozmístěny v rozmezí 40 až 60 km
- jednoduchá transformace na napájecí hladinu
- menší průřez trolejového vedení

#### *Nevýhody*

- nesymetrické zatížení třífázové sítě
- vozy s usměrňovači mají špatný účinník, odebírají jalový výkon a vytváří složky vyšších harmonických

- nemožná rekuperace do distribuční soustavy [2]

#### **2.2.4 Soustava 2AC 25 kV, 50 Hz**

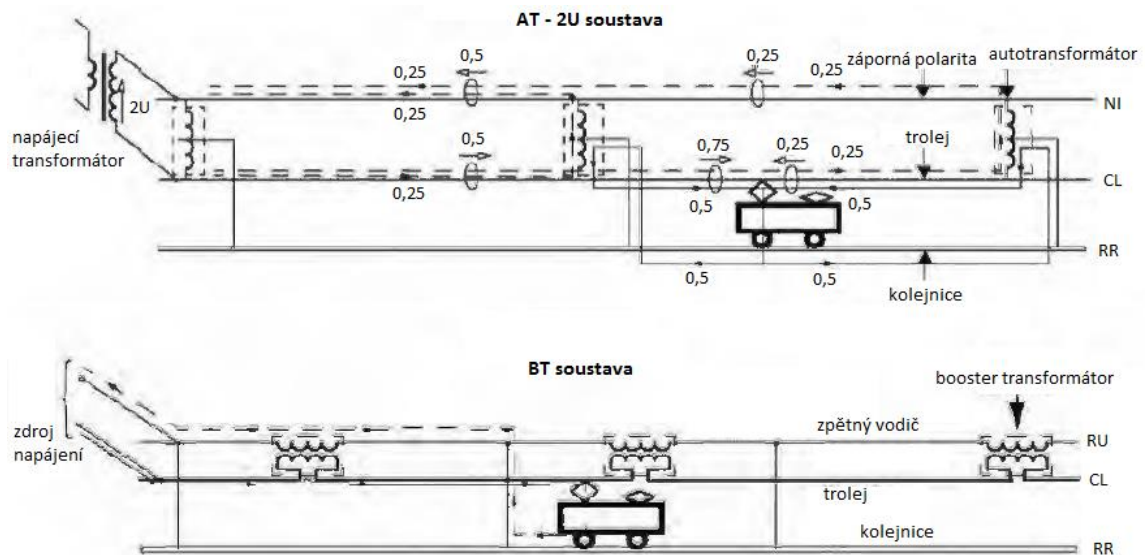
Výkonové omezení kolejových vozidel je závislé především na přenosových schopnostech trolejového vedení. Velikost přenášeného výkonu je dána parametry napájecího vedení, především impedancí. Vyšších výkonových toků můžeme docílit pomocí zvýšení napájecího napětí nebo snížením podélné impedance vedení. Napájecí soustava 2AC oba tyto parametry zlepšuje. Starší princip 2AC soustavy byl vyvinut ve Švédsku a vychází z použití zpětného vodiče, který je veden podél napájecí troleje. Zpětný vodič je zavěšen na trakčním stožáru a v průběhu trasy je ukolejňován. Mezi ukolejňenými úseky se zapojují booster transformátory (BT), které pomáhají odvádět zpětný trakční proud ze země.

V ideálním případě dochází ke vzájemné kompenzaci proudů trolejové části vinutí a vinutí zpětného vedení BT. Příklad zapojení je uveden na obrázku číslo 2 v dolní části.

Druhý modernější princip vychází z přivedení dvou vodičové linky o sdruženém napětí 50 kV co nejbližší k trakci. Následně, za pomoci autotransformátorů, dochází k transformaci na napětí 25 kV vůči kolejnici. Obecně se tedy jedná o dvoulinkové napájecí vedení, kde kladný pól +25 kV tvoří trolejové vedení. Záporné lano je oproti předchozímu principu izolovaně zavěšeno na trakčních stožárech a tvoří vedení o napětí -25 kV. Obě fáze jsou vůči sobě fázově posunuty o 180°. Příklad rozmístění je vyobrazen na obrázku číslo 2 v horní části.

Zapojení autotransformátorů mezi kladné a záporné vedení je takové, že střed vinutí je připojen na kolejnici, která tvoří zpětný vodič. Horní a dolní část vinutí je zapojena mezi obě vedení. Zpětný proud prochází kolejnici (popř. zemí) jen v úseku, kde se pohybuje trakční vozidlo, což snižuje okolní rušení a degradaci zemních pásků. Obrovskou výhodou modernějšího konceptu jsou 4x menší ztráty oproti systému s booster transformátory, které jsou důsledkem použitého 50 kV napětí. Takto zapojená soustava se označuje jako AT a byla vynalezena v Japonsku. Vzdálenost napájecích stanic je okolo 50 km. Autotransformátory jsou rozmístěny přibližně po 12 km.

Oba koncepty se v dnešní době v ČR nepoužívají. Jsou ale instalovány v Japonsku, Francii, Španělsku, Jižní Koreji, kde napájí dráhy pro rychlovlaky. Vysokorychlostní tratě jsou schopny provozovat vlakové jednotky až do výkonu 20 MW.



Obrázek 2 - Schématické zapojení soustavy 2AC 25 kV, 50 Hz, zdroj [2]

### Výhody

- vedení má nižší ztráty
- koncept umožňuje větší vzdálenost mezi napájecími stanicemi
- na troleji je menší úbytek napětí
- redukce zpětného proudu jen na úsek, kde se pohybuje vozidlo

### Nevýhody

- větší počet vodičů
- použití více autotransformátorů, vyšší cena
- technicky složitější napájecí stanice [1] [2]

## 2.2.5 Trakční napájecí stanice

Trakční napájecí stanice jsou systémy pro úpravu přivedené elektrické energie pomocí distribuční soustavy na elektrickou energii o vhodných parametrech pro napájení elektrických kolejových vozidel. Výstupem trakčních napájecích stanic je napájecí napětí, které se přivádí na trolejové vedení a uzemňovací bod pro přívod zpětného proudu. Zásadní požadavek je na uzemnění stanic, kde vznikají pro AC a DC soustavy různé požadavky.

Zpětná vedení musí zajistit bezpečný a spolehlivý přenos zpětného, popř. poruchového proudu zpět do napájecí stanice. Tím pádem musejí mít co nejmenší elektrický odpor.

Rozmístění a počet trakčních napájecích stanic podél celé trati podléhá několika základním požadavkům. Rozmístění musí zaručovat alespoň minimální hodnotu požadovaného napětí v celé délce napájeného úseku. To je ovlivněno jak napájecí hladinou, tak impedancí trakčního vedení. Dále musí zaručit bezpečné vypnutí zkratu v nejvzdálenějším místě elektrického vedení. [1]

### **2.2.6 Dělení trakčního vedení**

Rozdělení trakčního vedení se realizuje buď společně nebo bez spínacích stanic. Ty dokáží celou trať rozdělit do více napájených úseků. Spínací stanice je většinou úzce spjata s trakční měničnou, která daný úsek napájí. Výhodou děleného systému je snazší vypínání zkratů a případné ohraničení poruchy. Tu je možné konkrétně lokalizovat a zajistit napájení pro zbytek neporušené trati. Nevýhody můžeme vidět ve zhoršené rekuperaci, kdy se rekuperovaná elektrická energie pohybuje pouze v daném úseku. Dále dochází k většímu kolísání napětí a vznikají problémy s přejížděním dělicího místa.

Dělicí místa trakčního vedení mohou sloužit jak pro oddělení fází, tak i pro oddělení dvou různých napájecích hladin. Rozjetý vlak musí vyjet z aktuálního úseku a přes neutrální pole přejet do druhého úseku o jiném napětí nebo jiné fázi (3-fázové AC napájení). Neutrální pole je část vedení, která není napájena a tvoří izolační bariéru mezi dvěma různými úseky. Při jejím přejezdu není vlak z troleje napájen. Tím pádem musí být přejezd umístěn na vhodných místech tratě (nesmí být např. ve stoupání). Dalším problémem je nutnost stažení sběrače lokomotivy z důvodu nebezpečí vytažení elektrického oblouku při přejíždění z jednoho potenciálu na druhý. Stažení sběrače a odpojení od vedení má za následek přerušování trakčního výkonu, napájení pomocných pohonů, dobíjení akumulátorů, možnou rekuperaci a jiné. Ještě větší problémy mají se stažením sběračů vysokorychlostní jednotky. Při vysoké rychlosti jsou velmi často dělicí místa přejížděna, protože doba stažení sběrače vůči ujeté vzdálenosti při vysoké rychlosti je dlouhá.

Modernizace tratí má za cíl minimalizování počtu přejížděcích míst. Toho lze lehce dosáhnout u DC napájení, kde je celá síť napájena oboustranně. U střídavé sítě je oboustranné napájení náročnější, protože může dojít ke vzniku vyrovnávacích proudů. Důvodem dělení trakčního vedení u 3-fázové AC soustavy je možnost prohození fází a tím snížení nesymetrického jednofázového zatížení. [1] [9]

### **2.2.7 Rekuperace**

Rekuperace elektrické energie je proces, při kterém dochází k přenosu energie z brzdícího vozu do napájecího vedení. Jde tedy o opačný přenos výkonu. Princip rekuperace se především uplatňuje u napájení příměstských vozidel, kterých je více v jednom úseku. Většina napájecích soustav (kromě 16,7 Hz) není schopna přenášet rekuperovaný výkon zpět do distribuční soustavy. Z tohoto důvodu je nutné, aby byl vytvořený výkon okamžitě spotřebován jiným vozem, který se nachází ve stejném úseku tratě. Tok rekuperované energie z brzdícího vozu způsobuje růst napětí napájecího vedení. Aby byla rekuperace úspěšná, dochází u napěťových hladin ke zvyšování horní meze přípustného napětí. Limitem maximální hodnoty napětí jsou izolační a bezpečnostní možnosti vedení. U AC soustavy dochází i k přesycování magnetických obvodů transformátorů.

Napájecí systémy DC 3 kV jsou vybaveny zpravidla diodovými usměrňovači, které znemožňují zpětný přenos energie do distribuční soustavy. Maximální hodnotu napájecího napětí trakčního vedení je u této hladiny možné posunout nad  $1,2 U_n$ . Konkrétně se jedná o 3,9 kV po dobu 5 minut místo běžných 3,6 kV. Aktuální velikost napájecího napětí je na vozidle průběžně monitorována a v případě růstu nad maximální hodnotu dochází k pulznímu zapojení brzdných odporů. Ty jsou schopny pomocí pulzního připínání přebytečnou energii spálit.

Nejrozsáhlejší rekuperaci umožňuje systém 15 kV, 16,7 Hz. Trakční vozy jsou vybaveny čtyřkvadrantovým měničem, který umožňuje oboustranný průtok výkonu. Jelikož má systém vlastní distribuční soustavu, tak jsou i trakční měničky koncipovány na obousměrný přenos energie. Rekuperovaná elektrická energie se nemusí spotřebovat v daném traťovém úseku, ale může se přenést do jiného místa spotřeby pomocí distribuční soustavy. Trakční vozy nemají plnohodnotný brzdný odpor, protože se počítá se stálým využitím rekuperace.

Rekuperace na AC soustavě 25 kV, 50 Hz (popř. 2AC) je prakticky uskutečnitelná, ale v ČR se většinou nepoužívá. Je to z důvodu nesymetrického a nepravidelného napájení jedné fáze, skoků napětí, které nenadále nastávají a obchodních záležitostí. Pro dodavatele elektrické energie není výhodný zpětný odkup rekuperované energie.

Moderní vozy jsou vybaveny čtyřkvadrantovým měničem, který, oproti diodovému, umožňuje obousměrný tok proudu. Trakční transformátory jsou také schopny opačného přenášení výkonů. Největší problém tvoří potencionální tok elektrické energie zpět do distribuční sítě. V případě zkratu by mohlo dojít k napájení postiženého místa pomocí trakčního vedení, které tvoří paralelní cestu proudu. Aby tento jev nenastal, používá bezpečnostní prvek ve formě Wattového relé. Relé je schopno rozeznat směr výkonu a při naměření záporné činné složky okamžitě odpojuje trakční měnírnu. [1] [2]

### **2.2.8 Úbytky napětí**

S úbytky napájecího napětí se musí počítat ve střídavých i stejnosměrných soustavách. Pokles napětí je dán vlastnostmi trolejového vedení, především velikostí elektrického odporu (impedancí). Hodnota elektrického odporu se mění v závislosti na materiálovém složení lana. Trolejová sestava se skládá z nosného lana a samotné troleje. Jako příklad mohu uvést DC 3 kV systém, který má měděné nosné lano o průřezu 120 mm<sup>2</sup> a měděný trolejový drát o průřezu 150 mm<sup>2</sup>. Celkový odpor sestavy je 84 mΩ/km a roste s následným opotřebením.

Pro bezproblémový provoz kolejových vozidel mají napájecí soustavy definovány parametry maximální a minimální hodnoty napětí. Trakční měnírna, která napájí daný úsek je v praxi regulována tak, aby na začátku vedení byla maximální přípustná hodnota napětí. Elektrický odpor vedení se vzdáleností roste a tím pádem rostou i úbytky napětí. Je nutné zajistit, aby napětí i na konci napájeného úseku nepokleslo pod minimální hodnotu napětí. Pro uvedený příklad 3 kV systému (TD 150 Cu, NL 120 Cu) je napětí na výstupu z měnírny nastaveno na hodnotu 3,6 kV.

Úbytek napětí při napájení běžné příměstské jednotky 3 200 kW zajistí pokles napětí na hodnotu 1,98 kV ve vzdálenosti 15 km. Dle normy EN 50 163

jsou mezní hodnoty definovány maximálně 3,9 kV a minimálně 2 kV. Tím pádem popisovaný vůz již nelze po 15 km nadále z jedné měřírny provozovat.

Delší tratě je nutné napájet z více trakčních měníren, které jsou umístěny v určité vzdálenosti. Parametrem pro umístění měřírny je jak hodnota napětí, která musí být vyšší než minimální, tak možnost bezpečného vypnutí zkratu na nejbližším místě tratě.

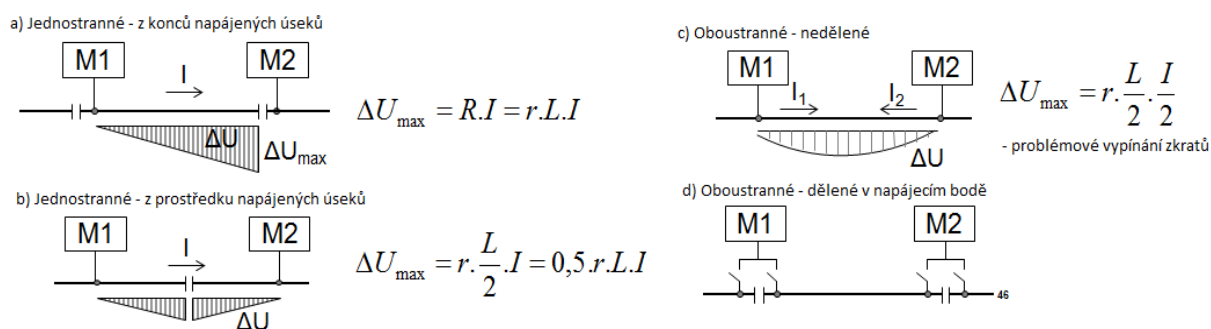
Rovnice číslo 1 definuje výpočet vzdálenosti měníren (L) při napájení troleje o napětí U se stejným průřezem lana (s odporem r), stejném úbytku napětí ( $\Delta U$ ) a stejném přenášeném výkonu (P).

$$L = \frac{\left(\frac{\Delta U}{U}\right) \times U^2}{P \times r} [m, V, V, V, W, \Omega]$$

Vzorec číslo 1 – Vzdálenost měníren, zdroj [1]

Ve střídavé soustavě o frekvenci 50 Hz se celková impedance pohybuje přibližně okolo  $(260 + j 450)$  m $\Omega$ /km. Promítají se zde vlivy paralelně běžících vedení, které tvoří induktivní vazby. Výhodou AC systémů je velikost napájecího napětí (25 kV), které má menší úbytky a zaručuje větší vzdálenost mezi měřírny. Přípustné meze se při jmenovitém napětí 25 kV podle EN 50 163 pohybují mezi 29 kV až 17,5 kV.

Spínací stanice v kombinaci s trakčními měřírny mohou tvořit různé rozložení napájecího napětí. Obrázek číslo 3 znázorňuje velikost úbytků napětí v závislosti na způsobu zapojení trakčních měníren. [1]



Obrázek 3- Úbytky napětí, zdroj [1]

## 2.3 Cesta elektrického proudu vozem

Předmětem této kapitoly bude seznámení se všemi hlavními prvky elektrické lokomotivy, které slouží k vedení elektrického proudu. Nebudu se zabývat konkrétním vnitřním uspořádáním vlaku (měniče, transformátor, motory, atd.), ale především vnějšími prvky (trakční a nápravový sběrač).

### 2.3.1 Sběrač elektrické energie

Rozvod elektrické energie je u vlaků realizován jednostopým nadzemním vedením (trolejovým drátem). Úkolem sběrače je bezproblémový přenos elektrického proudu za jízdy i při zastavení vozu. Při vyzdvižení musí vytvářet nepřerušovaný kontakt s trolejí a tím bránit odskokům od troleje, které by vedly k napalování styčných ploch. Na druhou stranu musí docházet k minimálním otěrům jak sběračové hlavice, tak trolejového drátu.

Největší důraz je kladen na zabezpečení proti zaseknutí a stržení vedení, které by vedlo ke zvýšení rizika úrazu elektrickým proudem.

Aby byla hlavice sběrače rovnoměrně opotřebována, není trolejový drát tažen rovně. Jeho rozmístění je klikaté a tím se zaručí stejného opotřebení hlavice v celé její šířce. Sběrací hlavice musí být dostatečně široká, aby zaručila kontakt s trolejí i při jejím maximálním vychýlení. V Evropě jsou používány šířky hlavic 1 950 mm s maximální stranovou výchylkou 550 mm, 1 400 mm a 1 600 mm s maximální stranovou výchylkou 400 mm. Vrchní část hlavice je opatřena smýkadlem ve tvaru lišty. Smýkadlo má za úkol tížený styk hlavice s trolejovým drátem. Jeho složení je tvořené měďnografitovým, popř. grafitovým materiálem, který zajišťuje co nejmenší opotřebení troleje.

Na mechaniku sběrače je kladen požadavek konstantního přitlaku k troleji. Síla přitlaku se pohybuje okolo 100 N a je opodstatněna požadavkem na stejnou velikost přitlaku ve všech úsecích tratě. Síla přitlaku by neměla být ovlivněna jak pracovní výškou sběrače, tak směrem pohybu (vytahování – zatahování). Ani rychlost vozidla se na přitlaku sběrače nemá výrazně projevovat. [3]

Mezi v současné době nepoužívanější typy sběračů se řadí:

- a) pantograf
- b) polopantograf.

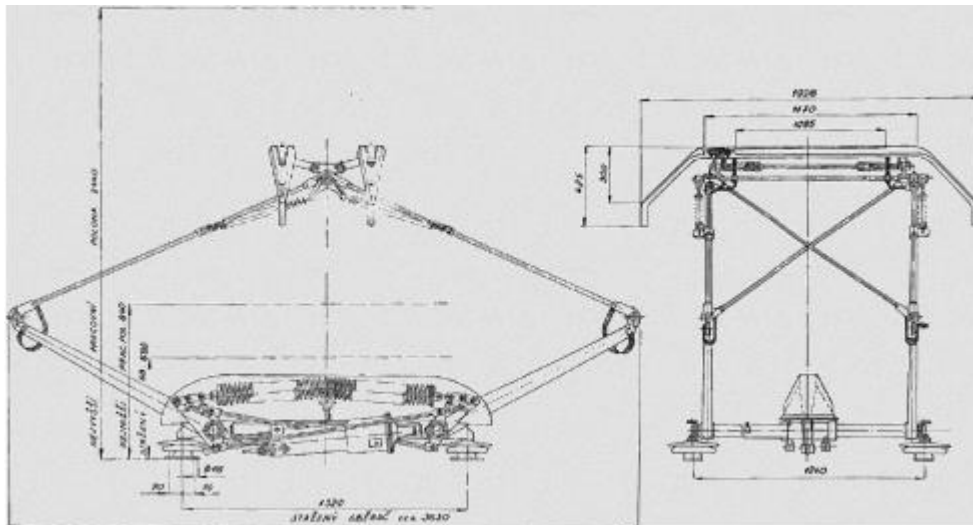


## Pantograf

Pantograf je dvouramenný sběrač elektrické energie, který se používá již od 70. let. Konstrukční řešení, které je na obrázku číslo 4 odpovídá sběrači lokomotivy Škoda E 499.0. Oproti polopantografu má pantograf jednodušší konstrukci, i když to tak na první pohled nevypadá.

Celá konstrukce pantografu je instalována na čtyřech izolátorech tak, aby za žádných okolností nedošlo k výskytu nebezpečného napětí na kostře lokomotivy. Mezi oběma rameny sběrače jsou nainstalovány pneumatické válce a pružiny. Vytažení sběrače se pak děje následujícím způsobem. Po pokynu obsluhy se do válce tlakuje provozní kapalina, která posune píst na převod. Ten způsobí zvedání spodních pák, na kterých jsou umístěny lišty se smýkadly. V této aplikaci jsou použita dvě smýkadla, která jsou vypružena pro stálý styk s trolejí.

Pro menší opotřebení dříve používaných měděných obložení byla smýkadla vybavena drážkami, které se plnily grafitovou vazelínou. [3]



Obrázek 4 - Pantograf, zdroj [13]

## Polopantograf

Polopantograf je nejnovější typ sběračů, který se začal instalovat v roce 1971 na lokomotivy řady 110. Funkční vlastnosti jsou stejné jako má pantograf, ale konstrukce je odlišná. Na obrázku číslo 5 je polopantografový sběrač od společnosti Stemmann, který se skládá ze základních očíslovaných částí. Polopantograf má jedno rameno (4) s vodící tyčí (5) a dvě horní vzpěry (3). Horní vzpěry jsou uzpůsobeny pro hlavu sběrače (2) se smýkadly (1), které se instalují většinou čtyři. Pohyb sběrače umožňuje vzduchová jednotka (6). Vše je umístěno

do rámu sběrače (7), který je položen na izolátorech (8). Jedinou nevýhodou polapantografu je složitější zdvih ramena.

Mezi výhody se především řadí lepší kontaktování s trolejí, než je tomu u pantografu.



Obrázek 5 – Polopantograf Stemann technik, zdroj [14]

### **Volba sběrače**

V případě, že je lokomotiva vybavena dvěma sběrači, je velmi důležité určit, který bude připojen k troleji a bude odebírat elektrický proud. Správná volba sběrače (zadní nebo přední) je důležitá pro účinnost odběru elektrického proudu, velikost opotřebení a minimalizace poškození sběrače, popř. troleje. Za předpokladu, že je vlak tažen jednou lokomotivou vpředu, výběr sběrače můžeme určit podle počasí.

Za sucha je vhodné použití zadního sběrače. Tvar lokomotivy při jízdě vytváří zesponu na zadní sběrač menší tlak vzduchu než na přední sběrač. Díky tomu se smýkadla zadního sběrače při suchu méně opotřebovávají.

Menší tlak vzduchu na zadní sběrač není vhodný při deštivém počasí. Horší kontakt způsobí vyšší přechodový odpor mezi trolejí a sběračem, který vede k jiskření. Při jiskření dochází k nadměrnému opotřebovávání smýkadla. Problém lze z velké části vyřešit zapojením předního sběrače, který je proudícím vzduchem více přitlačován k troleji. I za použití předního sběrače dochází k vyššímu opotřebování smýkadla.

V zimním období se na troleji běžně vyskytuje námraza, která brání přímému kontaktu s trolejí. Při rozjezdu a jízdě do 50 km/h se proto běžně používají oba sběrače najednou. Přední sběrač brousí trolej od námrazy a neodebírá elektrický proud. Zadní sběrač má díky tomu menší přechodový odpor a odebírá potřebnou energii z troleje. Při rychlosti nad 50 km/h je vytažen pouze přední sběrač z důvodu nebezpečného rozkmitání troleje (může dojít ke stržení) při vytažení obou sběračů.

Vedle nebezpečí stržení troleje při špatné manipulaci se sběrači je nebezpečné i přepálení trolejového drátu. K přepálení může dojít v případě stání a vytápění soupravy. Odebíraný proud je sice menší než za jízdy, ale odebírá se stále z jednoho místa. Trolejový drát se v místě odběru nadměrně ohřívá a může dojít až k přepálení. Proto se při stání musí zvednout oba sběrače a tím rozdělit odebíraný proud. [3]

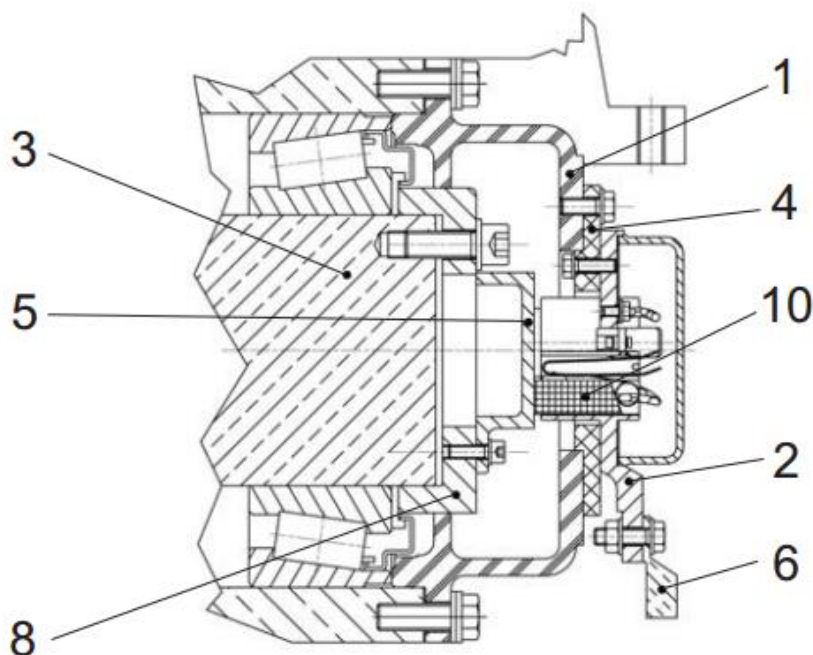
### **2.3.2 Nápravový sběrač proudu**

Požadavky na konstrukci, výrobu a zkoušení nápravových sběračů proudu se zabývá stále platná norma ČSN 36 2324 z roku 1971. Požadavky jsou definovány převážně pro stejnosměrné 3 kV a jednofázové 25 kV, 50 Hz soustavy (po dohodě i pro jiné systémy). Funkce nápravového sběrače je svedení pracovního, ale i zkratového proudu z vozidla do kolejnice. Důležitou podmínkou je svedení proudu mimo kluzná a valivá ložiska, která by průchodem proudu značně degradovala. Proto musí být ložiska uložena izolovaně. Kromě ložisek musí být vůči sobě izolována dvojkolí s rámem podvozku.

Trakční motor, převodovka, mechanická brzda a jiná zařízení nesmí izolované spojení narušit, a i zpětný proud ze zařízení musí být veden přes nápravový sběrač.

Mezi nejpodstatnější konstrukční údaje nápravových sběračů patří hodnoty jmenovitého proudu, maximálního proudu při jízdě a stání vozidla, zkratového proudu, maximální otáčky dvojkolí, prostředí, ve kterém bude systém pracovat a druh sběrače. Velké požadavky jsou i na technické parametry. Jmenovitý proud sběrače nesmí způsobit nadměrné oteplení, popř. poškození styčných a vodivých ploch jak za jízdy, tak při stání vozidla. Přechodový odpor mezi vozidlem a sběračem nesmí být větší než  $0,01 \Omega$ . Stejnosměrné systémy do 3kV musí odolat zkratovému proudu 18 kA při době vypnutí 60 ms. Jednofázové střídavé soustavy 25 kV musí obstát při průchodu zkratového proudu o hodnotě 5 kA po dobu 200 ms. Vedle požadavku na krytí a mechanické provedení je zajímavý požadavek na ořesuvzdornost. Nápravové sběrače totiž musí odolat sinusovým vibracím o kmitočtu 1 Hz až 50 Hz ve všech třech směrech. Dále v podélném směru musí odolat přetížení 50 g.

Základní složení nápravového sběrače je na obrázku číslo 6. Konkrétně se jedná o sběrač pro trakční jednotky od firmy Stemmann. Odebraný proud z konstrukce vozidla se přenáší pomocí kabelu na vstupní kontakt (6) a držák sběrače (2). Přes držák sběrače se proud dostává na uhlíkový kartáč (10). Ten zaručuje ideální kontakt s, při jízdě rotujícím, kontaktním kotoučem (5) na hřídeli dvojkolí (3), který je připevněn k víku (8). Nápravový sběrač je pomocí izolace (4) elektricky oddělen od pouzdra ložiska (1).



Obrázek 6 - Nápravový sběrač proudu Stemmann technik, zdroj [15]

## 2.4 Mechanika trakčního vedení, kolejnice

### 2.4.1 Kolejnice a kolejové obvody

Vlaková kolejnice plní několik specifických funkcí. Mezi mechanické funkce patří schopnost přenášení nápravové síly a její rozložení na pražce, vedení dvojkolí v příčném směru a vytvoření hladké dráhy pro pohyb vozu. Kolejnice také musí zvládat rozjezdové a brzdové síly vlaku. Požadavky na elektrické funkce jsou především schopnost vedení zpětného proudu a zabezpečení pomocí kolejových obvodů. V České republice se používají kolejnice tvaru UIC60 (60 E1) a S 49 (49 E1), které vyplývají z evropských požadavků. Kódové označení S 49 popisuje hmotnost 49 kg/m a typ kolejnice. Na vysokorychlostních a silně zatížených tratích je v Evropě používána kolejnice typu UIC60 s hmotností 60 kg/m.

Následujícími vzorci si z hmotnosti kolejnice UIC60 vypočítáme nejprve průřez kolejnice  $S$  a následně odpor kolejnice  $R$  na jeden metr:

$$S = \frac{m}{l * \rho_m} = \frac{60}{1 * 7870} = 7,62 * 10^{-3} m^2$$

$$R = \rho * \frac{l}{S * l} = 0,248 * \frac{1}{7,62 * 10^{-3} * 1} = 32,5 \mu\Omega/m$$

*Vzorec číslo 2 – Elektrický odpor kolejnice UIC60*

Koeficient  $\rho_m$  je měrná hmotnost železa a koeficient  $\rho$  je rezistivita kolejnice UIC60. Vypočítaný odpor kolejnice bude uplatněn v matematickém modelu.

Pro výrobu kolejnice se používají dvě technologie. První, v dnešní době již zastaralá, je technologie výroby z ingotů. Podstatnou nevýhodou je zde rozmístění nečistot při tavení. Nečistoty se dostávají na povrch kolejnice a zhoršují její elektrické vlastnosti. Evropská norma EN 13674 proto výrobu z ingotů zakazuje. Druhá technologie, která se dnes nejčastěji používá, je kontinuální lití kolejnice.

Odlívání zajistí vytvoření ocelových prutů, které jsou homogenní. Pruty jsou následně za tepla válcovány do konečné podoby a kaleny. [5]

Materiálové složení se odvíjí především od mechanických požadavků na kolejnici. Použitá ocel, která má jakost 900 A se používá na běžné koridory. V jejím složení je velmi důležitý obsah uhlíku, který zvyšuje tvrdost, pevnost a odolnost, ale i křehkost. Pro další zlepšení mechanických vlastností se používají legující prvky, například mangan. Příměsi uhlíku a manganu sice zlepšují mechanické vlastnosti, ale na druhou stranu znatelně zvýší elektrický odpor kolejnice. Zpětný trakční proud, který se má kolejnicí vracet zpět do měřírny, pak hledá jiné cesty, které mají menší elektrický odpor (např. půda). Je zajímavé, že se technologie výroby kolejnic vůbec nezaměřuje na elektrické vlastnosti použité oceli. I z tohoto důvodu pak vznikají nemalé problémy při systematickém vedení zpětného proudu.

Na snižování vodivosti se nemalým dílem podílí i kolejnicové styky. Ty tvoří spojení mezi jednotlivými díly kolejnice a musí umožňovat dilataci kolejnice při změně teploty, únosnost kolejnice a souvislost vrchní (pojízdné) hrany. Spojky, které se vkládají mezi horní část kolejnice a patu, jsou upevněny pomocí šroubů. Místní spojení narušuje tuhost a pevnost kolejnice a zvyšuje elektrický odpor. Nejčastěji se spojení kolejnic realizuje převislým kolejnicovým stykem. Kolejnice jsou spojeny v bodě, který leží mimo pražce a tím je zaručena pružnost spoje.

Pro nás nejdůležitější parametr kolejnicového styku je vodivost spoje. Zde se spoje dělí na **izolované, elektrovedné a přechodové**. Izolované spoje se uplatňují na kolejnicích, které jsou zabezpečeny elektrickými kolejovými obvody. Plastová spojka je vyrobena z polyamidu a má doplňkovou izolační vložku. Montážní šrouby pak není nutné dále izolovat. Izolovaný spoj nepřenáší podélné síly. Problém ale vzniká při vedení zpětného proudu, který přes izolované spojky nemůže téct. Řešením tohoto problému mohou být dvě možnosti. První možnost je použití **kosé propojky**, která se uplatní v jednopásovém kolejovém obvodu (proud teče jen jednou kolejnicí). Propojku tvoří kabel, který překlenuje izolované kolejnice a zároveň je kříží (obrázek 7a). Druhou možností pro dvoupásové kolejové obvody (proud teče oběma kolejnicemi) jsou **stykové transformátory**. Elektrický proud je veden do vstupního vinutí transformátoru, které má ve středu spojku s druhým transformátorem. Ve druhém transformátoru je proud opět rozveden do kolejnic (obrázek 7b).

Rušení kolejových obvodů je eliminováno, protože zpětný trakční proud vždy prochází opačným směrem a tím se vyruší. V sekundárním vinutí obou transformátorů je umístěn zdroj, popř. přijímač kolejových obvodů.

Při vjezdu soupravy do chráněné oblasti dojde ke zkratování (šuntování) kolejového obvodu. Tím dojde k poklesu signálního proudu přes přijímač a systém hlásí obsazenost tratě.



Obrázek 7 - Propojení izolovaných kolejnic, zdroj [6]

Přechodové spojky jsou speciálního tvaru, protože spojují kolejnice různých tvarů. Jejich zásadní vlastností je udržení výšky pojižděné hrany a plynulost přechodu. Poslední, elektrovedné, spoje jsou uplatňovány na kolejích, které přenáší zpětný proud. Propojky musí mít co nejmenší elektrický odpor a co nejlepší kontakt s kolejnicí (malý přechodový odpor). Vodivé spojení kolejnic se doplňuje měděnými, popřípadě ocelovými lany, zakončenými montážním okem. Popsaný propoj se ke kolejnici upevňuje rozebíratelným spojem. Nerozebíratelné pájené spoje jsou dnes již zakázány. [5] [6]

**Kolejové obvody** jsou základním prvkem pro bezpečnost provozu. Jejich funkcí je snímání polohy vozidla, které se pohybuje na trati, a komunikace vozu s dispečinkem. Tvoří tedy základní bezpečnostní opatření, a proto musí pracovat spolehlivě. Kolejový obvod se skládá z napájecí strany a snímací strany, která vše vyhodnocuje. Pomocí kolejových obvodů se přenáší i kód vlakového zabezpečovacího zařízení, který kontroluje práci strojvedoucího a zabezpečuje průběh jízdy.

Kolejové obvody pro izolované kolejnicové spoje jsem již popsal výše. Mimo nich se používají i sériové a paralelní kolejové obvody, které se rozlišují podle způsobu zapojení zdroje, přijímače a nápravy vozu. Paralelní systém je oproti sériovému bezpečnější, protože při poruše vždy automaticky odepne přijímací relé. Princip jeho funkce je takový, že přijímací a napájecí strany jsou rozmístěny na koncích izolovaného sektoru. Když vůz vjede do chráněného

sektoru, tak zkratuje bezpečnostní obvod. Generovaný proud protéká přes projíždějící nápravu vozu, a to způsobí rozepnutí snímacího relé. Kolej je následně prohlášena za obsazenou.

Pro správnou funkci zabezpečovacích systémů musí snímací obvod správně vyhodnocovat proud kolejových obvodů. Ten může být rušen provozním proudem vozidla, který se také uzavírá přes kolejnici. Z tohoto důvodu se proud kolejových obvodů musí frekvenčně odrušit. V České republice se používají proudy o hodnotě 100 mA a frekvenci od 25 Hz až po 275 Hz. [1] [6]

## 2.4.2 Trolejový vodič

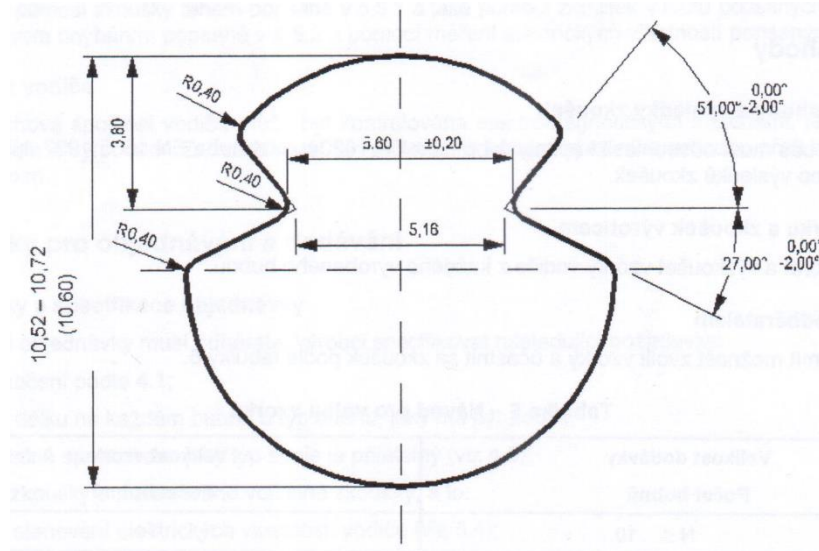
Funkci trolejového vedení jsem již v předcházejících kapitolách uvedl. Zde bych rád navázal na mechanické vlastnosti a druhy materiálů trolejového drátu. Následně se zaměřím na popis různých způsobů zavěšení. Požadavky na profilový trolejový vodič, který se skládá z mědi a slitin mědi jsou definovány technickou normou ČSN EN 50149 ed. 2.

Základní materiál pro výrobu je měď s běžnou nebo vysokou pevností (CuETP, CuFRHC). Pro zlepšení mechanických vlastností (pevnost v tahu, poměrné prodloužení) se používají i různé slitiny mědi. Konkrétně se jedná o slitinu mědi a stříbra (CuAg<sub>0,1</sub>), mědi a kadmia (CuCd<sub>0,7</sub>), mědi a hořčíku (CuMg<sub>0,2</sub>) a mědi a cínu (CuSn<sub>0,2</sub>). Různé materiálové složení deklaruje i různé minimální pevnosti v tahu, které se pohybují od 310 MPa (měď s běžnou pevností) až po 520 MPa (slitina mědi s hořčíkem). Vedle materiálového složení se trolejové dráty vyrábí i s různým jmenovitým průřezem 80 mm<sup>2</sup>, 100 mm<sup>2</sup>, 107 mm<sup>2</sup>, 120 mm<sup>2</sup> a 150 mm<sup>2</sup> a s hmotnostmi od 690 kg/km až 1378 kg/km. Z pohledu elektrických vlastností se dráty rozdělují podle maximální hodnoty rezistivity a odporu na kilometr. Maximální hodnota odporu na jeden kilometr při teplotě 20 °C nesmí překročit hodnotu od 0,385 Ω/km (CuMg<sub>0,5</sub>, 80 mm<sup>2</sup>) do 0,122 Ω/km (CuAg<sub>0,1</sub>, 150 mm<sup>2</sup>). [7]

Provedení a profil trolejového vodiče je vyobrazen na obrázku číslo 8. Konkrétně se jedná o normalizované provedení trolejového vodiče AC–80. Horní část vodiče obsahuje upínací drážky pro upevnění nosných úchytů. Zde se za pomoci svorek vodič uchytlí na nosné lano, které je vedeno nad ním. Díky



definovaným drážkám je vodič pevně zakotven a držáky nezasahují do dráhy vlakového sběrače. [7]



Obrázek 8 - Trolejový vodič AC-80, zdroj [7]

Vedení trolejového vodiče se dělí na dva druhy a to **prosté** a **řetězovkové**. Prosté vedení je tvořeno jedním trolejovým drátem, který je prověšený. Pomocí napínání vedení můžeme prověšení jen z části eliminovat. Při tom vznikají vysoké síly v tahu, které drát abnormálně zatěžují. Z těchto důvodů se prosté vedení realizuje pouze pro nízké rychlosti (60 – 100 km/h) například u tramvají.

Řetězovkové vedení se skládá ze soustavy nosného lana a trolejového drátu. Nosné lano může být částečně prověšeno a je vedeno nad trolejovým drátem. Trolejový drát je k nosnému lanu přichycen pomocí laníček. Díky tomuto zavěšení je trolejový vodič rovný a stále ve stejné výšce nad kolejnicemi. Sběrač projíždějícího vlaku má tak dokonalý kontakt s napájecím vedením.

Elektrizovaná trať je rozdělena do jednotlivých úseků vzdálených až 1 500 m a zakončených napínacími stožáry. Trolejový drát je přes napínací stožáry stále napínán pomocí kladkostroje se závažím. V letním a zimním období dochází k teplotní roztažnosti obou lan, což také kompenzují zavěšená závaží. I když dochází ke změně roztažnosti, tak se napjatost ani průhyb nemění. Možný podélný posuv vedení je minimalizován kotevními stožáry, které jsou rozmístěny ve středech úseků.

Vedení troleje v oblouku je charakterizováno odchylkou vedení od osy oblouku. Čím více je trolej tažena mimo tuto osu, tím širší sběrač musí vlak mít. V rovných úsecích je ale určitá klikatost vedení důležitá. [1] [8]

Je to z důvodu rovnoměrného obrušování smýkadla sběrače. Kdybych měl shrnout hlavní požadavky na trakční vedení, zdůraznil bych především zajištění žádaného proudového odběru vozu, stálý kontakt sběrače bez jakýchkoliv odskoků, minimální otěr jak troleje, tak sběrací lišty a provoz bez rizika zachycení a stržení trakčního vedení.



*Obrázek 9 - Řetězovkové vedení se závažím*

## **2.5 Interoperabilita**

Interoperabilita představuje schopnost více systémů se sebou navzájem spolupracovat. V tomto případě se jedná o kompatibilitu jednotlivých trakčních systémů v celé Evropské unii. Cílem Evropské komise je vytvoření souborů předpisů, které jasně definují technické, technologické a elektrické požadavky na vlakovou infrastrukturu každé členské země. V mé práci se zaměřím především na „NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) č. 1301/2014 o technické specifikaci pro interoperabilitu subsystému energie železničního systému v Unii“ ze dne 18. 11. 2014. Nařízení se zabývá technickými specifiky pro interoperabilitu (TSI) a jsou zde obsaženy především požadavky na subsystém energie, funkční a technické specifikace, jednotlivé prvky interoperability, posouzení shody a odbornou kvalifikaci pracovníků.

Hlavní součástí směrnice je subsystém energie, který se dělí na trakční napájecí stanice, spínací stanice, oddělovací úseky (oddělují buď různé elektrické soustavy, nebo různé fáze), systém trakčního vedení a zpětný obvod pro vedení zpětného trakčního proudu. Všechny popsané prvky je nutné v rámci železničního systému kontrolovat.

Kromě kontroly parametrů napájecí elektrické energie (především napětí a frekvence) je nutné sledovat i rozhraní navazujících systémů, pravidla údržby a provozování. Je nutné dodat, že TSI neomezuje odlišné systémy, které jsou technicky inovativní. Jen je nutné pro ně vypracovat specifické metody posuzování. [9]

### 2.5.1 Požadavky na funkční a technické parametry

Dodávaný trakční výkon je závislý na typech napájených vlaků, jejich maximální rychlosti a požadavku na hodnotu příkonu na sběračích. Nebudu zde dále opakovat již probrané kapitoly o napájení a geometrii trolejového vedení, ale zaměřím se na podrobnosti, které zatím nebyly zmíněny. Z pohledu výkonosti napájecí soustavy se uvažuje maximální proud vlaku, který zaručuje provoz souprav s výkonem menším než 2 MW bez proudového omezení, hodnota účinníku a střední užitečné napětí.

Napájecí soustava	Provozní rychlost nad 200 km/h	Provozní rychlost pod a včetně 200 km/h
AC 25 kV, 50 Hz	22 500 V	22 000 V
AC 15 kV, 16,7 Hz	14 200 V	13 500 V
DC 3 kV	2 800 V	2 700 V
DC 1,5 kV	1 300 V	1 300 V

Tabulka 1 - Minimální střední užitečné napětí na sběrači, zdroj [9]

Kromě hodnoty účinníku se ve střídavých soustavách uvažují i hodnoty vyšších harmonických a dynamických jevů.

U trolejového vedení je podstatným parametrem především jeho výška, která se liší pro jednotlivé maximální rychlosti. V případě, že vlaky dosahují rychlostí menších jak 250 km/h, musí být jmenovitá výška troleje mezi 5 000 až 5 750 mm nad zemí. Pro rychlosti rovné a vyšší 250 km/h je jmenovitá výška mezi 5 080 až 5 300 mm nad zemí. [9]

## 2.5.2 Provedení TSI

Povinností každého členského státu je vypracování TSI s vlivem na propojení celého železničního systému Evropské unie. Všechny nové, obnovené a modernizované tratě musí vycházet z požadavků TSI. Volba napěťové hladiny je v kompetenci každého státu, který musí zohlednit jak potřebné výkonové parametry, tak následnou návaznost na jiné napěťové systémy.

Směrnice definuje pouze požadavek na volbu střídavého napájení v případě tratí s provozní rychlostí nad 250 km/h. Z hlediska trolejového vedení se musí přihlížet na jeho geometrii a to na překlenování mezi navazujícími vedeními v sousedních lokalitách. Přísný požadavek je kladen na rozchod kolejí a výšku trolejového vodiče.

Při modernizaci (obnově) tratě dojde k dosažení shody s TSI až po kompletním dokončení prací. V některých případech nemusí být požadavky TSI přesně splněny, avšak členský stát musí jasně deklarovat proč a z jakých důvodů se tak stalo. Směrnice následně zohlední specifické rysy pro danou lokalitu. [9]

## 3. Praktická část

V praktické části se nejdříve zaměřím na problematiku vedení zpětného trakčního proudu. S tím souvisí rozdíly mezi AC a DC napájecími systémy jak ze strany realizace, tak z pohledu ochrany osob. Následně realizuji model vlakové soupravy, na kterém budu zpětný trakční proud simulovat.

### 3.1 Vedení zpětného trakčního proudu

#### 3.1.1 Rozdíly mezi AC a DC tratí

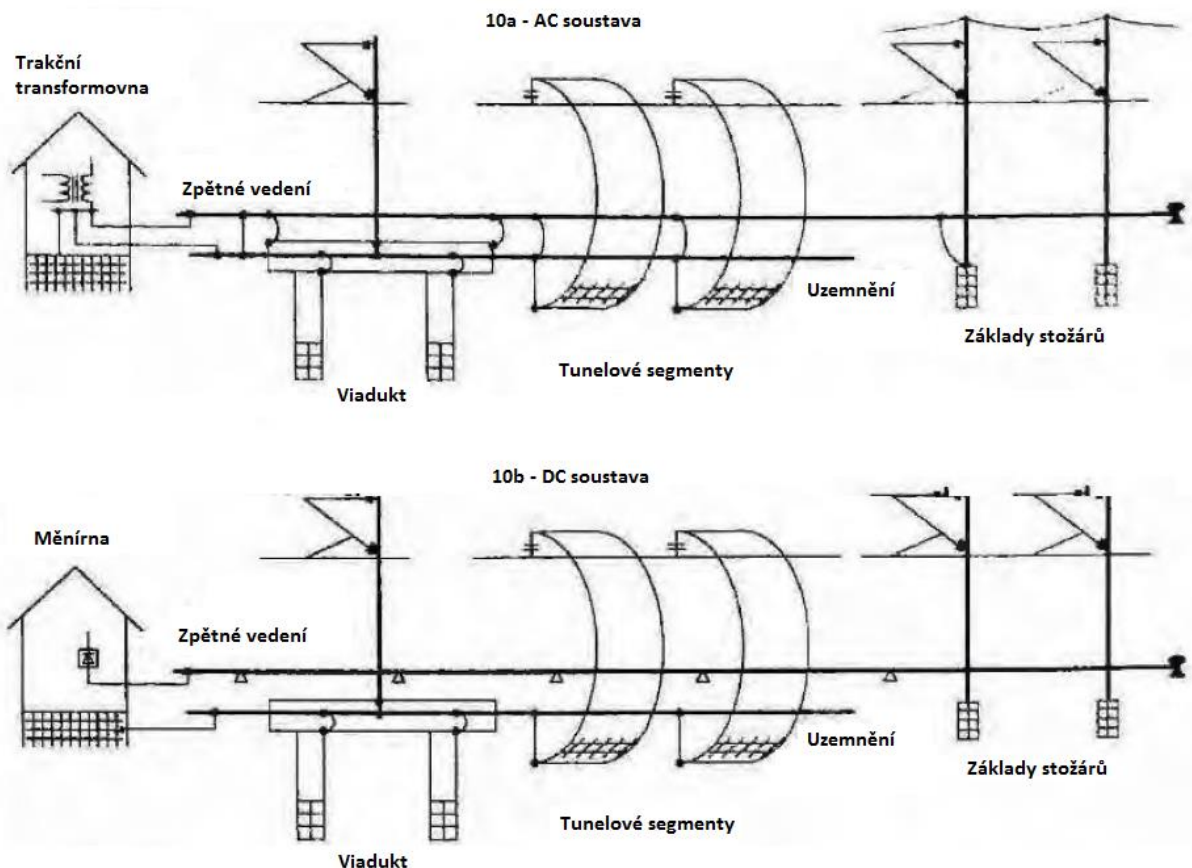
Obecně platí, že systémy pro zpětné vedení proudů musí zajistit bezpečný, spolehlivý a co nejkratší přenos proudu do trakční napájecí stanice. Nejedná se však jen o zpětné trakční proudy, ale i o zkratové a poruchové proudy. Z uvedeného vyplývá, že zpětná cesta musí být s co nejmenším elektrickým odporem. Díky němu vzniká minimální elektrický potenciál kolejí proti zemi. Uvedeným pojmem „země“ rozumíme vodivou zeminu, která se nachází v tak velké vzdálenosti od napájené tratě, že případně měřený elektrický potenciál ve všech místech je roven nule. To znamená, že daná lokalita už není ovlivněna zemními proudy.

#### *Střídavé AC tratě*

Cesta zpětného vedení elektrického proudu, zpravidla pomocí kolejnic, se u střídavých soustav musí uzemňovat. K uzemnění kolejnic a přídatných lan se používají zemniče, například ve formě paralelních zemních pásek podél celé trati. Zemní pásek má za úkol vodivé spojení kolejnice se dříve definovanou zemí. V důsledku toho jsou do země vedeny zpětné proudy, které mohou narušovat kovová vedení, trakční stožáry a rušit elektronické systémy. Důvodem uzemňování AC soustav jsou induktivní napěťové úbytky, které vznikají ve vedení zpětného trakčního proudu. Při frekvenci 16,7 Hz jsou sice srovnatelné s úbytky v DC soustavách, ale při frekvenci 50 Hz jsou až dvojnásobně vyšší. Zde narážíme na hranici bezpečného provozování, protože v případě delších traťových úseků dochází k vytváření nebezpečně vysokých elektrických potenciálů vůči zemi. Příklad uzemnění AC tratě je vyobrazen na obrázku číslo 10a.

## Stejnoseměrné DC tratě

Na rozdíl od AC tratí se stejnosměrné soustavy nesmí přímo uzemňovat. Podstatné je dodržení co největšího elektrického odporu kolejnic proti zemi, a to v celé délce tratě. V případě, že by došlo k vodivému propojení kolejnice se zemí, do země začnou pronikat bludné proudy. Bludné proudy DC soustav jsou nebezpečné pro jakékoliv zemní kovové instalace. V průběhu času dochází k elektrolytickým dějům, které korozivně napadají uložená zařízení. Příklad uzemnění DC soustavy pomocí průrazkových bleskojistek (průrazek) je na obrázku číslo 10b. Průrazka je zařízení, kterým se musí uzemňovat všechny instalace podél DC tratě. Její funkcí je izolování kolejí vůči okolním instalacím. V případě výskytu nebezpečného dotykového napětí se průrazka otevře a vytvoří tak vodivou cestu. [2]



Obrázek 10 - Napájecí soustavy, zdroj [2]

### 3.1.2 Střídavé AC systémy pro napájení elektrických tratí

Technický pokrok, který s sebou přináší vyšší trakční výkony a s tím i vyšší trakční proudy, přinesl nové koncepce řešení. Ty zvýšily bezpečnost elektrických systémů a snížily velikost magnetického pole.

Starší systémy, které využívají jednu napájecí stanici pro daný úsek, mají zásadní nevýhodu jak v poklesu napětí se vzdáleností od stanice, tak v rozptylu zpětného trakčního proudu do země. Nové systémy, které popsany problém řeší, používají soustavy autotransformátorů, popřípadě booster transformátorů. Funkce autotransformátorů již byla popsána v kapitole „2.2.4 Soustava 2AC 25 kV, 50 Hz“, a proto se zde zaměřím převážně na booster transformátory.

Booster transformátory jsou dvouvinuťové transformátory s převodem 1 : 1. Primární vinutí je zařazeno do trolejového vedení a prochází jím trakční proud. Sekundární vinutí je ve stejném úseku připojeno ke kolejím a protéká jím proud stejné velikosti, ale opačného směru. Tento proud přesměrovává cestu zpětného proudu do zpětného vodiče, zavěšeného na trakčních stožárech. Popsaný princip eliminuje rozptýlení zpětného trakčního proudu do okolní země a přesně definuje jeho cestu k trakční měničce. Nevýhodou booster transformátorů je nutnost rozmístění ve vzdálenostech 3 až 5 km od sebe, což značně prodražuje počáteční náklady na realizaci tratě.

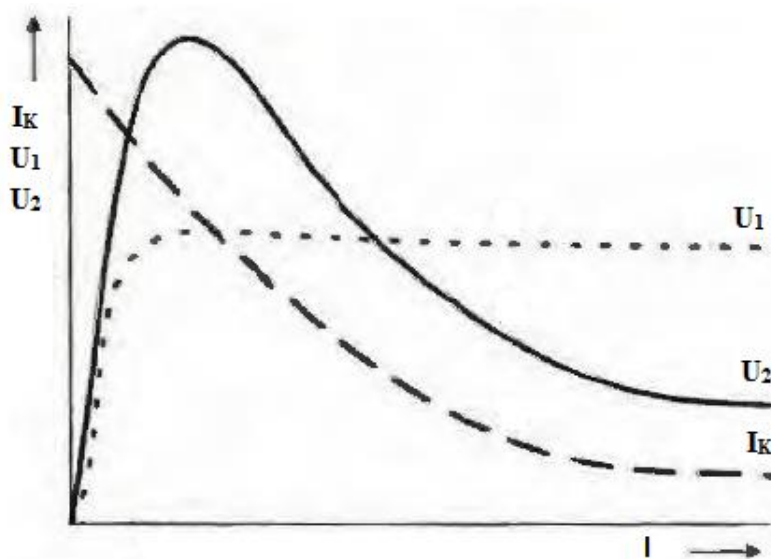
Levnějším řešením, které sice není tak účinné při eliminaci zpětných proudů, ale pro bezpečnost dostačující, je systém zpětných vedení. Na trakčních stožárech jsou tažena lana pro zpětný trakční proud. Každých 200 m až 600 m jsou odbočkou propojena s kolejnicí a okolními uzemňovacími soustavami. Konkrétně se jedná o spojení se stožáry, uzemněním pro nn zařízení, kovovými díly mostů, tunelů, viaduktů, atd. Pro ještě lepší propojení uzemněných prvků se vzájemně vodivě propojují i jednotlivé kolejnice. Zpětný vodič, zavěšený v blízkosti napájecí troleje vytváří podstatnou induktivní vazbu, která má za následek snížení velikosti magnetického pole v okolí vedení. Funkce zapojení je výrazně závislá jak na vhodném umístění zpětného vodiče, tak na kvalitě a pravidelnosti uzemňování okolních zařízení.

### Nebezpečné dotykové napětí

Spojení neživých vodivých částí v blízkosti vedení je důležité propojovat u všech střídavě napájených systémů. Je to především z důvodu zamezení výskytu nebezpečného dotykového napětí jak při provozu, tak při poruše. V důsledku přetržení trakčního vedení může dojít k vytvoření napěťového potenciálu na neživé části vedení a tím i výskytu životu nebezpečného dotykového napětí. Správné vodivé pospojování všech neživých částí zaručí včasné vypnutí poruchy pomocí elektrických ochran.

Problematické úseky, které jsou v souběhu s DC systémem, nelze přímo uzemňovat. V tomto případě se musí na zpětné vedení tratě zapojit omezovač napětí. Nepřípustná situace vzniká při vytvoření potenciálu kolejnicí vůči zemi, který musí být v přípustných mezích pro bezpečné dotykové napětí. Velikost potenciálu závisí na impedanci kolejí vůči zemi, provozních a zkratových proudech, místě zkratu a na vzdálenosti soupravy od napájecí stanice.

S rostoucí vzdáleností od trakční napájecí stanice se potenciál kolejí vůči zemi zvyšuje. Růst potenciálu v závislosti na vzdálenosti od napájecí stanice je uveden na obrázku číslo 11. Zde se rozlišují dva průběhy napětí,  $U_1$  který vzniká při konstantním trakčním odběru a  $U_2$ , který je při zkratu. Křivka  $I_K$  zobrazuje průběh zkratového proudu se vzdáleností  $l$  od napájecí stanice. Hodnota zkratového proudu bude nejvyšší při zkratu na napájecí stanici, ale potenciál kolejí vůči zemi bude nulový.



Obrázek 11 - Průběh napětí na kolejnicích, zdroj [10]



Největší hodnota dotykového napětí se vyskytuje ve vzdálenosti několika km od napájecí stanice. Jeho hodnota se měří v jednémetrové vzdálenosti od neživých částí, které jsou spojeny s kolejnicí. Při průměrném vyhodnocení může dosahovat hodnota dotykového napětí ( $U_R$ ) 20 % až 50 % napětí kolejnice vůči neutrální zemi ( $U_{RE}$ ).

Následující tabulka vyobrazuje konkrétní dovolená dotyková napětí pro různé vypínací časy poruch. Uvedené hodnoty vychází z nejvíce nepříznivého stavu a to 50 %  $U_{RE}$ . Novější ochrany mohou pracovat s vypínacím časem menším jak 100 ms, ale i v tomto případě se uvažují hodnoty pro čas rovný 100 ms. [10]

Hodnota dovolených dotykových napětí	$U_R$ (V)	$U_{RE}$ (V)
Provozní dotyková napětí $t > 300$ s	60	120
Provozní dotyková napětí $t = 300$ s	65	130
Poruchová dotyková napětí $t = 100$ ms	842	1684

Tabulka 2 - Dovolená dotyková napětí, zdroj [2]

#### Typy vlivů na okolní zařízení

Vedení zpětného trakčního proudu může vytvářet následující vlivy, které mají negativní dopad na zařízení v okolí tratě. Mezi méně nebezpečné vlivy patří ohmické a kapacitní vlivy. První z nich vznikají v důsledku propojení se systémem zpětného vedení. Kapacitní vlivy jsou minimální, takže se v praxi neuvažují. Mezi nebezpečné se řadí induktivní vlivy a vlivy magnetických polí. Jejich velikost je závislá na rozmístění trakčního vedení, které tím vytváří různé hodnoty vlastní a vzájemné impedance, a na rozložení zpětného trakčního proudu.

V ideálním případě bychom za pomoci zpětných vedení dokázali dokonale odvádět zpětný trakční proud, který by se nerozšiřoval do okolní země. Bohužel ve střídavě napájených trakcích dochází k rozptylu zpětného trakčního proudu, který následně ovlivňuje okolní systémy. Záleží však na citlivosti dotčených zařízení a tím spojené jejich ovlivňování či degradace.

### *Zpětné vedení*

Vedení je tvořeno jak kolejnicovým systémem tratě, tak případným doplňkovým lanovým vedením. Pro rovnoměrné rozdělení zpětného proudu do všech kolejí a lan se musí prvky vzájemně vodivě propojovat. Četnost propojování je závislá na vlnové impedanci zpětného vedení a na velikostech dotykového napětí. Vzdálenost propojení se prakticky pohybuje v rozmezí 200 m až 1200 m.

Mimodrážní zařízení, která se nachází v blízkosti tratě a jsou dále odbočována od koridoru, se nesmí ukolejňovat. Docházelo by k dalšímu rozptylu zpětného proudu do okolí a k problematickému odvádění zpět do trakční napájecí stanice. Z tohoto důvodu jsou odbočující potrubí elektricky rozdělena izolačním mezikusem, který zamezuje cestě zpětného proudu. Odbočená strana potrubí se potom uzemní na uzemnění veřejné sítě a tím se oddělí od uzemňovacího systému tratě.

Dimenzování zpětného vedení musí vyhovět maximálním možným proudům, které mohou vzniknout při zkratu nebo atmosférickém přepětí. Velikost zpětných proudů je vhodné na hranici napájecí stanice aktivně monitorovat. Realizace se provádí za pomoci měřících transformátorů proudu, kde je jeden transformátor zapojen do přívodu zpětného proudu tekoucího zemí. Druhý měřící transformátor vyhodnocuje velikost proudu, který teče zpětnými vedeními kolejnic a lany. Součet proudů se musí co nejvíce blížit hodnotě vyvedeného trakčního proudu.

### *Atmosférické přepětí*

Přílehlá trakční zařízení je nutné jak z hlediska bezpečnosti, tak ze strany živostnosti, chránit proti atmosférickým přepětím, které se velmi často vyskytují. Uzemnění náchylných zařízení jako jsou sloupy vedení, rozváděče aj. se provádí spojením s vedením zpětného proudu. Samotný propoj musí být co nejkratší, bez ohybů a s patřičným průřezem, aby měl co nejmenší elektrický odpor a indukčnost. Rozváděče, ve kterých je umístěna citlivá technika, jsou doplněny i o vhodnou přepětovou ochranu. Ve střední Evropě se velikosti proudů způsobené atmosférickým přepětím pohybují v rozmezí 40 kA až 60 kA.

Oproti trakčním zařízením, která se uzemňují až po výstavbě je zde problém se železobetonovými konstrukcemi, které se musí vhodně propojovat během stavby. K propojení ocelových armatur se musí použít proudově dimenzované propojky, které se ve spojích přivařují. Všeobecně platí, že přivařený propoj je z hlediska přenosu proudu v řádu desítek kA lépe vodivý než šroubový, který postupem času koroduje. Po výstavbě se musí propojenost všech železných částí změřit. Při měření se vyhodnocuje velikost odporu, potenciál vůči kolejnici a indukovaná napětí.

Stejně parametry se vyhodnocují i při měření systému kolejnic. Pro věrohodnost měření je nutné umístění zdroje co nejdále od měřící soupravy. Zdroj musí být schopný udržovat konstantní velikost měřeného proudu po celou dobu.

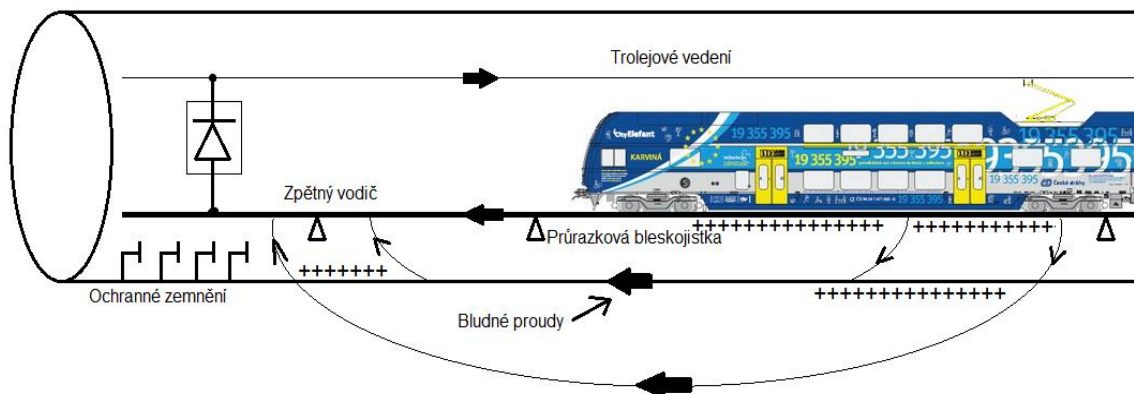
Nejprve se vyhodnocuje potenciál kolejnic vůči neutrální zemi. Pro modelování nejnepříznivějšího stavu se měří i hodnoty při napájení jedné kolejnice, které představují nejhorší zkratový proud. [10]

### **3.1.3 Stejnoseměrné DC systémy pro napájení elektrických tratí**

Funkce celého stejnosměrného systému vychází z přivedení vysokého napětí pomocí distribuční linky až k trakční rozvodně. V trakční rozvodně dochází k usměrnění střídavého napětí a snížení jeho velikosti na 3 kV (popř. 1,5 kV). Nižší napájecí napětí s sebou přináší vyšší proudy oproti střídavým soustavám. Stejnoseměrný systém je problémový i z hlediska vedení zpětného trakčního proudu. Jak jsem se již zmínil, zpětné vedení (kolejnice) musí být důsledně odděleno od země. Stejný požadavek platí i pro trakční rozvodnu, která se neuzemňuje, ale ukolejňuje.

Na následujícím obrázku můžeme vidět schématický princip zpětného vedení pomocí kolejnice při jednostranném napájení. I když není kolejnice přímo uzemňována, i přes to dochází k únikům bludných proudů do okolí tratě. Unikající proudy v půdním prostoru vytváří elektrochemické děje, které způsobují rozrušování a degradaci kovových dílů. Ve spodní části obrázku je vykreslen způsob ochrany pomocí navzájem propojených strojených a stavebních zemničů.

Ochranné zemnění je izolováno od kolejnice a slouží k přizemnění všech okolních staveb, jako jsou například AC přívodní linky. [10]



Obrázek 12 - Způsob ochrany okolních systémů DC tratí

Nemalý požadavek je kladen na bezpečné provozování DC tratí s ohledem na dovolené hodnoty dotykových napětí. Při návrhu se musí uvažovat nejenom účinky provozních proudů, ale i vlivy poruchových a zkratových proudů.

Poslední dva zmíněné stavy způsobují ve zpětném vedení podélné napětí, které je úměrné velikosti zpětného proudu. Z hlediska bezpečného provozování se musí vypočítat velikost potenciálu vůči zemi, který v daných případech vzniká.

### 3.1.4 Aktivní a pasivní zpětný vodič

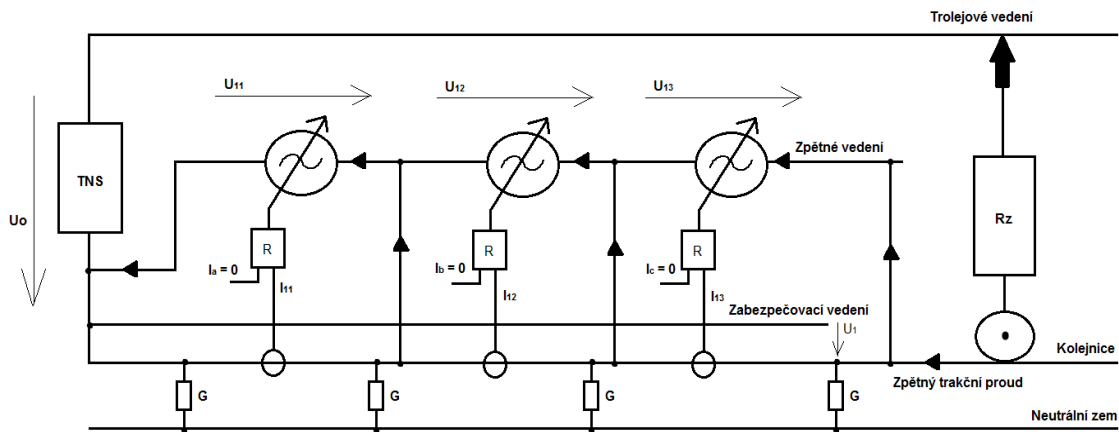
Stále se zvyšující výkony trakčních zařízení s sebou přináší i zvyšující se hodnoty zpětných proudů. Z tohoto důvodu se stále vyvíjí prostředky pro kvalitní a spolehlivé zpětné vedení. V následujících odstavcích se zaměřím na principy funkce aktivního a pasivního zpětného vodiče.

**Pasivní zpětný vodič** je tvořen běžným zpětným vedením bez jakýchkoliv doplňujících prvků pro rovnoměrné a přímé vedení zpětného proudu do trakční měničky. Jeho uplatnění je především ve střídavých tratích a má následující výhody:

- jednoduché a levné provedení
- snižuje indukované napětí v zabezpečovacích zařízeních
- umožňuje bezpečné provozování s dovolenými hodnotami dotykového napětí
- redukuje magnetické pole v okolí tratě
- snižuje poklesy napětí v trakčním vedení.

Mezi zásadní nevýhody patří neschopnost odvedení veškerého zpětného trakčního proudu. Přibližně 20 % se ho rozptýluje do okolí a k napájecí stanici se vrací půdním okolím. Značné zlepšení s sebou přináší již popisované autotransformátory a booster transformátory. Ty sice dokáží zmenšit podíl unikajícího zpětného proudu do půdy, ale nejsou schopny vytvoření stejného proudového zatížení v jednotlivých úsecích.

**Aktivní** zpětný vodič je schopen vytvoření stejných proudových zatížení všech AC traťových úseků. Jak již název napovídá, funkce aktivního vodiče je podmíněna zapojením aktivních prvků, které směřují tok zpětného trakčního proudu. Princip funkce si popíšeme na následujícím obrázku.



Obrázek 13 - Aktivní zpětný vodič - princip funkce

Obrázek číslo 13 znázorňuje jednostranné napájení střídavé tratě pomocí trakční napájecí stanice TNS s napětím  $U_0$ . Rezistor  $R_z$  představuje pohybující se vozidlo. Mezi jednotlivými úseky jsou znázorněny svodové poměry  $G$  mezi kolejnicí a neutrální zemí. Zpětný trakční proud teče kolejnicí do místa, ke kterému je připojeno zpětné vedení. Zpětné vedení je realizováno lanem ze slitiny hliníku a vedeno na trakčním stožáru vedle trolejového drátu. Každých 300 m je zpětné vedení kontaktováno s kolejnicí. Jak je patrné na obrázku, v každé smyčce zpětného vedení je zapojen řízený napěťový zdroj s regulátorem  $R$ .

Funkci jedné smyčky si můžeme popsat například na části zpětného vedení se zdrojem  $U_{13}$ . Přidružený regulátor monitoruje velikost zpětného proudu, vracejícího se kolejnicí a tím vyhodnocuje proud  $I_{13}$ . Druhým vstupem

regulátoru je žádaná hodnota zpětného trakčního proudu kolejnicí  $I_c$ , která je rovna 0.

Regulátor tedy nastavuje řízený napěťový zdroj tak, aby se (v ideálním případě) veškerý zpětný trakční proud přenášel pomocí zpětného vedení až do TNS.

Správnou funkcí aktivního zpětného vodiče se docílí redukci zpětného proudu kolejnicí a zemí až na 3 % původní velikosti. Zbýlých 97 % protéká zpětným vedením. Pro porovnání si uvedeme hodnoty proudů při nečinnosti aktivního vodiče. Zavedeme si proudy  $I_0$  (odebíraný proud vlakovou soupravou z troleje),  $I_1$  (zpětný trakční proud zpětným vedením),  $I_2$  (zpětný trakční proud kolejnicí) a  $I_3$  (zpětný trakční proud zemí).

V poměru k proudu  $I_0$  se zpětným vodičem uzavírá přibližně 27 %, kolejnicí teče 40 % a zemním systémem 33 % zpětného trakčního proudu. Vektorovým součtem získáme součet všech proudů jako:

$$I = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{I_0} > 100 \%$$

*Vzorec číslo 3 – Součet zpětných proudů, zdroj [11]*

## 3.2 Vysokorychlostní vlak

Pro model vlakové soupravy v programu Matlab mi nebyl zadán konkrétní typ vysokorychlostního vlaku. Z tohoto důvodu jsem si pro získání základních parametrů vybral jako příklad vlak Velaro D (Class 407). Ostatní zástupci vysokorychlostních vlaků si jsou v základních parametrech s Velarem D velmi podobní.

Velaro D je čtvrtým zástupcem skupiny Velaro a byl vyroben pro Německé dráhy, které vlakové soupravy využívají na vysokorychlostní trati mezi Německem a Francií. Jeho předchůdci jsou v provozu například ve Španělsku, Číně a Rusku. Vysokorychlostní vícesystémová vlaková jednotka se skládá z osmi vozů a je schopna jízdy při napájení AC 25 kV, DC 3 kV, DC 1,5 kV, a AC 15 kV (16,7 Hz). Maximální rychlosti 320 km/h jsou vozy schopné dosáhnout při napájení AC 25 kV a výkonu 8 000 kW. Při napájení DC 3 kV je výkon soupravy omezen na 4 200 kW a maximální rychlost na 220 km/h. Délka celé soupravy je 200 metrů a disponuje sedadly pro 460 cestujících.

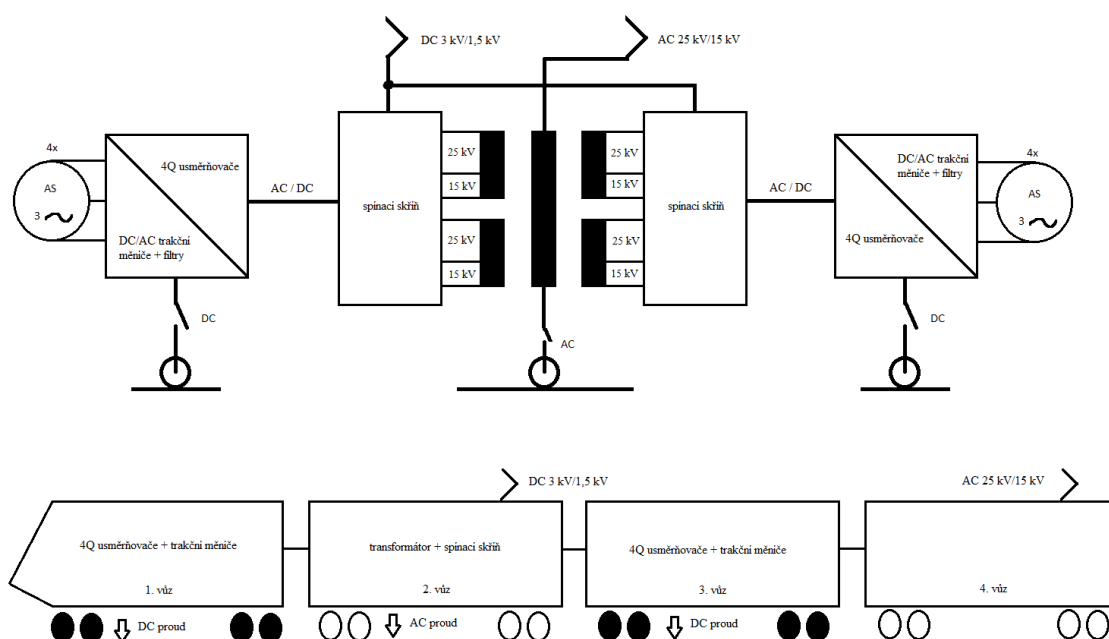


Obrázek 14 - Velaro D (Class 407), zdroj [16]

Velaro D má oproti svým předchůdcům vylepšenou aerodynamiku a vyšší komfort pro cestující. V rámci tohoto popisu se zaměřím výhradně na technické záležitosti a parametry vozu, které jsou uvedeny i v tabulce číslo 3. Schéma vícesystémového zapojení je znázorněno na obrázku číslo 15. Z hlediska uspořádání soupravy jsou v čelním a třetím voze umístěny napěťové měniče s IGBT prvky pro napájení asynchronních motorů, které pohání vždy oba podvozky vozu (černě označená dvojkolí). Ve druhém voze je umístěn

transformátor pro galvanické oddělení od trolejového vedení a snížení napájecího napětí.

Vřazený transformátor je v horní části vyveden na napájecí trolej o napětí AC 25 kV nebo 15 kV. Transformátor disponuje čtyřmi sekundárními vinutími, která jsou rozdělena dle hladiny střídavého napětí. Sekundární vinutí jsou dále připojena do spínacích skříní. V případě jízdy pod DC trolejí je napájecí napětí přivedeno přímo do spínacích skříní. Následně se napájecí napětí rozvádí do okolních vozů číslo jedna a tři. Zde jsou umístěny čtyřkvadrantové (4Q) usměrňovače a pulzně šířkový napěťový měnič pro napájení čtyř asynchronních motorů. Pro rekuperační režim jsou všechny usměrňovače schopny obousměrného provozu.



Obrázek 15 - Schéma vícesystémové jednotky

Elektrické ukolejnění systému schematicky znázorňují vypínače DC prvního a třetího vozu pro stejnosměrné napájení a vypínač AC druhého vozu při střídavém napájení. Čtvrtý vůz je konstruován jako tažený, tzn. bez hnaného dvojkolí. Všechny čtyři vozy, které jsem popsal, tvoří první polovinu celé soupravy. Druhá polovina obsahuje stejně vybavené vozy, ale je k první zapojena opačně (vůz popisovaný jako první je řazen až na konci).



Polopantografové sběrače jsou umístěny na druhém a sedmém voze pro stejnosměrné napájení a na čtvrtém a pátém voze pro střídavé napájení. Umístění sběračů pro střídavé napájení na tažených vozech má své důvody. U AC napájení se lépe detekuje svodový proud na kostru vozidla pomocí rozdílového transformátoru, kterým netečou při stejném výkonu tak velké proudy jako v DC systému. Proto je výhodnější i přes vysoké napětí přivádět raději AC než DC napětí z jiného vozu. Vlastní zdroj zpětného trakčního proudu v soupravě tvoří výkonové měniče při stejnosměrném napájení a transformátory při střídavém napájení.

Z uvedeného vyplývá, že moderní vlaky nejsou klasické koncepce, kdy jsou vozy taženy lokomotivou. Soupravy jsou postaveny na konceptu ICE 3, který rozděluje výkonové prvky mezi několik vozů. Příkladem je těžký transformátor, který je uložen v jiném voze, než jsou motory a výkonové měniče. Koncept ICE 3 přináší lepší rozložení hmotnosti mezi všechny vozy a zakomponování více hnacích podvozků do celé soupravy.

### Technická data

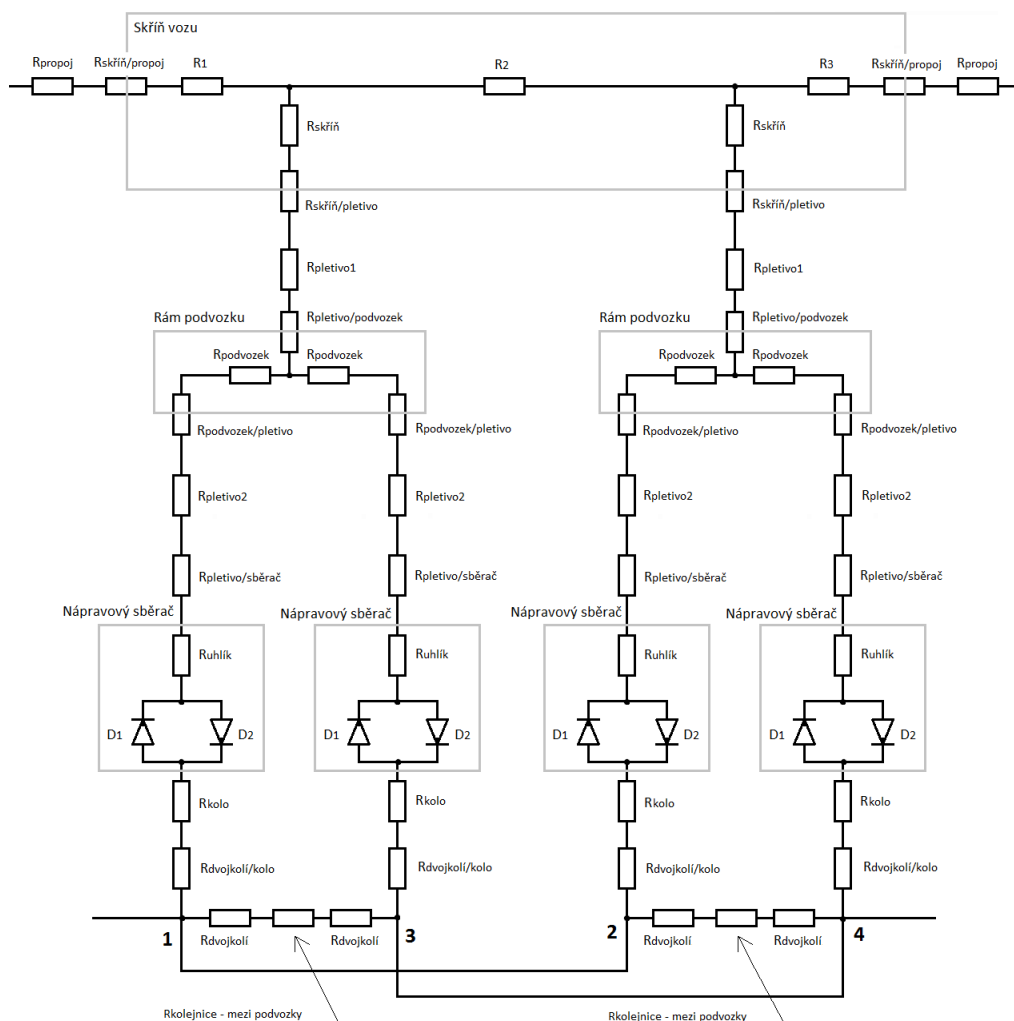
Maximální rychlost	320 km/h
Délka vlaku	200 m
Napájecí systém	15 / 25 kV AC a 1,5 / 3 kV DC
Trakční výkon	8 000 kW při 25 kV AC
Brzdící systém	Rekuperační, indukční a pneumatické
Počet dvojkolí	32
Počet hnacích dvojkolí	16
Typ podvozku	Bo'Bo'+2'2'+Bo'Bo'+2'2'+2'2'+Bo'Bo'+2'2'+Bo'Bo'
Rozchod dvojkolí	1 435 mm
Délka krajních vozů	25,7 m
Délka ostatních vozů	24,2 m
Polopantografy	2 x 3 kV DC, 1,5 kV DC / 2 x 15 kV (16,7 Hz) AC, 25 kV, (50 Hz) AC
Zatížení jednoho dvojkolí	< 17 t

Tabulka 3 – Příklad parametrů vysokorychlostní jednotky, zdroj [11]

### 3.2.1 Popis a schéma jednotlivých vozových rezistorů

Pro stanovení velikosti a směru zpětných trakčních proudů jsem musel sestavit náhradní obvod každého vozu, který popisuje jednotlivé elektrické odpory jeho neživé části, modelované rezistory. Mezi ně jsou zahrnuty přechodové odpory, odpory měděných kabelových propojení, odpor hliníkové skříňe vozu, odpory podvozků, dvojkolí atd. Samozřejmě veškerá propojení by při střídavém napájení vykazovala i určitý kapacitní, popřípadě induktivní charakter. V mém modelu jsem tyto vlivy zanedbal.

Na následujícím obrázku jsou schematicky uvedeny majoritní elektrické rezistory vlakového vozu. Hodnoty jednotlivých rezistorů jsem převzal z práce pana Ing. Pavla Hodase, který je fyzicky naměřil na vlaku metra M1. S odborným konzultantem jsme se usnesli, že jednotlivé vozové rezistory rychlovlaků se nemohou tak výrazně lišit, a proto jsem je v mé práci mohl také použít. [12]



Obrázek 16 – Rezistorové schéma vozu

Obrázek číslo 16 vykresluje uspořádání rezistorů ochranné neživé části hnaného vozu na stejnosměrně napájené trati. Stejnosměrná trakce se vyznačuje izolovaným vedením kolejnic, a proto jsem zde zanedbal elektrické vlivy okolního kolejového podloží. Pro model jsem uvažoval ideální trať s dokonalým stykem kol s kolejnicí. Číselné označení jednotlivých sběračů se váže na schématický nákres podvozku.

V horní části jsou schematicky zobrazeny podélné a příčné rezistory skříňě vozu, společně se vstupním a výstupním mezivozovým propojením. Příčný rezistor skříňě  $R_{\text{skříň}}$  je uměle vložený rezistor o hodnotě  $20 \text{ m}\Omega$ . Jeho účel je omezení velikosti podélného proudu skříňí vozu. Musíme si však uvědomit, že podélné proudy nejsou zanedbatelné, a proto je důležité měřit elektrický výkon, který se na rezistoru bude měnit na teplo, a podle toho jej dimenzovat. Následně je skříň spojena s rámem podvozku pomocí měděného pletiva. Přes rám podvozku se ochranné propojení rozděluje na dva nápravové sběrače. Nápravový sběrač je tvořen uhlíkovým kontaktem, který představuje nelineární impedanci. Z interpolací naměřených U-I charakteristik nápravových sběračů byla určena závislost  $U = U_N + R_N * I$ . Hodnota  $U_N$  je modelována antiparalelním zapojením dvojicí diod s prahovým napětím  $U_N = 0,21 \text{ V}$ . Antiparalelní zapojení dvou diod je použito z důvodu obousměrného toku elektrického proudu. Hodnota  $R_{\text{uhlík}}$  představuje elektrický odpor nápravového sběrače.

Vedle již popsaných rezistorů mají v náhradním obvodu výrazný vliv i přechodové odpory. Ty, jak je vidět z následující tabulky, představují nezanedbatelnou hodnotu. Pro model kolejnice jsem zvolil standardizovanou kolejnici s označením UIC60, která se běžně používá na rychlostních a vysoce frekventovaných tratích. Hodnota elektrického odporu kolejnice je při teplotě  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  rovna  $32,5 \text{ }\mu\Omega/\text{m}$ . Velikost kolejnicového rezistoru mezi podvozky a mezi vozy se liší pouze délkou dané části kolejnice.

Označení	R <sub>N</sub> (μΩ)	Popis
R <sub>propoj</sub>	380	mezivozové propojení 95/1
R <sub>skříň/propoj</sub>	35	přechodový odpor
R <sub>1</sub>	7	krajní podélný odpor
R <sub>2</sub>	2	podélný odpor skříňe
R <sub>3</sub>	7	krajní podélný odpor
R <sub>skříň</sub>	20000	příčný odpor skříňe
R <sub>skříň/pletivo</sub>	230	přechodový odpor
R <sub>pletivo1</sub>	200	odpor prvního pletiva
R <sub>pletivo/podvozek</sub>	50	přechodový odpor
R <sub>podvozek</sub>	45	odpor podvozku
R <sub>podvozek/pletivo</sub>	170	přechodový odpor
R <sub>pletivo2</sub>	150	odpor druhého pletiva
R <sub>pletivo/sběrač</sub>	3	přechodový odpor
R <sub>uhlík</sub>	200	odpor nápravového sběrače
R <sub>dvojkolí</sub>	1	odpor dvojkolí
R <sub>dvojkolí/kolo</sub>	320	přechodový odpor
R <sub>kolejnice – mezi podvozky</sub>	565	vzdálenost 17,4 m

Tabulka 4 - Seznam vozových rezistorů, zdroj [12]

Elektrický odpor veškerých propojení jsem vypočítal pomocí vztahu:

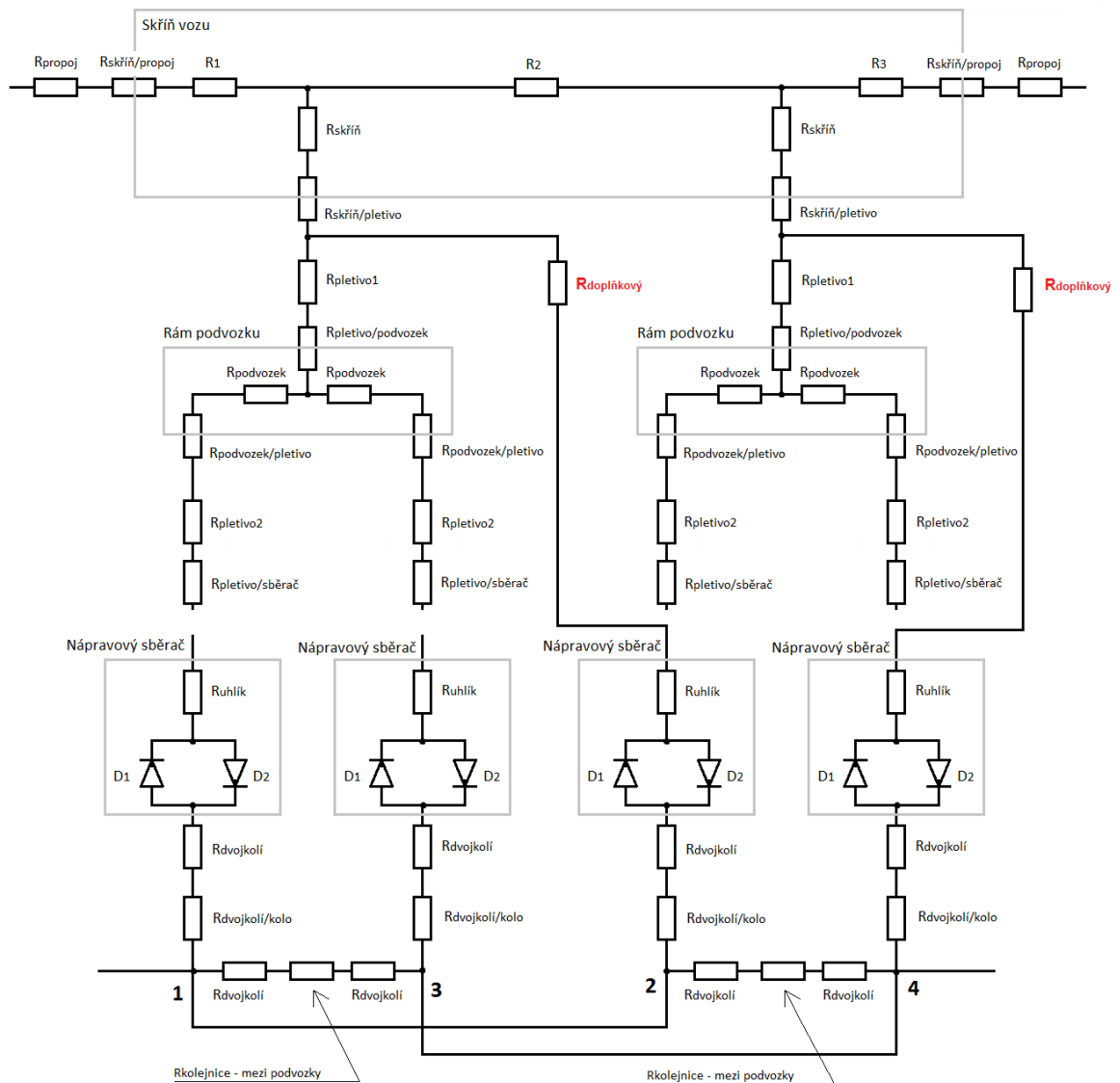
$$R = \frac{\rho * l}{S} [\Omega, \Omega m, m, m^2].$$

Vzorec číslo 4 – Elektrický odpor propojení

Například u mezivozového propojení 95/1 byl průřez S = 95 mm<sup>2</sup> a délka l = 1 m. Pro všechny případy jsem zvolil elektrovodnou měď s rezistivitou ρ = 0,018 μΩm.

### 3.2.2 Modifikované zapojení vozových rezistorů

Uvedené schéma vozových rezistorů je teoreticky korektní a správné, ale v praktické aplikaci by z několika důvodů nebylo příliš výhodné. Jak je patrné z tabulky číslo 4, majoritní podíl na velikosti elektrického odporu celé cesty proudu vozem tvoří přechodové odpory mezi pletivou a konstrukcí. Vhodnou modifikací by bylo počet propojení omezit. Na kompletní vůz jsou vedle elektrických vlastností kladeny mimo jiné i bezpečnostní požadavky. Vozy pro osobní přepravu musí deklarovat odolnost při přetížení minimálně 1 g pro skříň vozu, 15 g pro podvozek a 50 g pro nápravový sběrač společně s dvojkolím ve všech směrech. Uvedené požadavky jsou kladeny i na všechny součásti, které jsou k dané části připojeny.



Obrázek 17 - Modifikované zapojení rezistorů vozu

Problémem propojovacích pletiv není jen samotný přechodový odpor, ale i požadavek na vždy jinou mechanickou odolnost spoje. Například pletivo z rámu podvozku na nápravový sběrač musí vyhovět na jedné straně přetížení 15 g a na druhé straně 50 g.

Na obrázku číslo 17 je schéma vozových rezistorů lehce poupraveno dle zmíněných nedostatků. Všechny rezistory zůstaly nezměněny a byl vložen doplňkový rezistor  $R_{\text{doplňkový}}$  o hodnotě 25 mΩ. Přímou tuto hodnotu byla zvolena z důvodu požadavku na maximální velikost celkového odporu mezi skříň a kolejnicí 50 mΩ.

Rezistor  $R_{\text{doplňkový}}$  představuje vložený doplňkový rezistor a odpor propojovacích pletiv. Takto složené uzemňovací propojení je vyvedeno z  $R_{\text{skříň/pletivo}}$  až na nápravový sběrač. Tím se eliminují přechodové odpory a počet potřebných pletiv. Požadavek na odolnost při vysokém přetížení 50 g je kladen pouze na jedno pletivo na každém podvozku. Z důvodu zvýšení spolehlivosti ukolejnění jsou propojení na každém voze instalována dvakrát (každé na jiný podvozek).

V tomto případě je možné zapojení pracovního a ochranného propojení ve verzích B a C (viz kapitola 3.2.3 Pracovní a ochranné uzemnění podvozku). Je to z důvodu přímého vyvedení uzemnění až na nápravové sběrače. Nevýhodou popisované modifikace je nepřímé ukolejnění podvozku přes skříň, a ne přímo přes nápravový sběrač. Při pádu troleje a dotyku s podvozkem by zkratový proud tekli přes skříň a až poté do kolejnice.

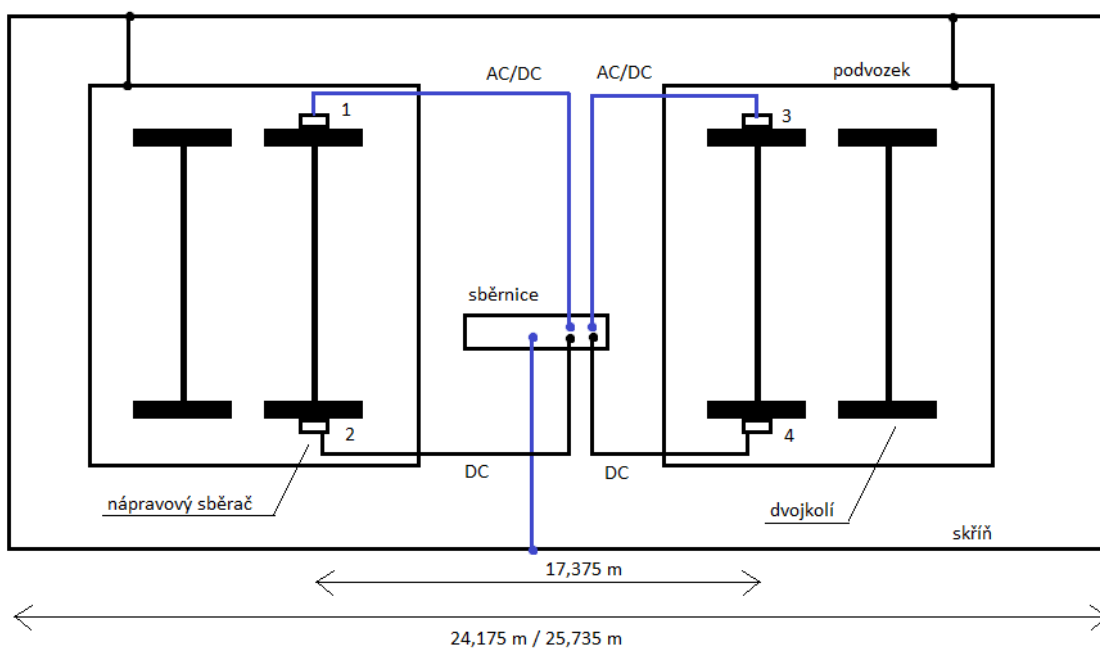
### **3.2.3 Pracovní a ochranné uzemnění podvozku**

U vozů soupravy, které jsou vybaveny výkonovým měničem anebo transformátorem, se do obvodu ochranného propojení musí implementovat i pracovní vedení. Pracovní vedení představuje část výkonového měniče, popř. transformátoru, která se spojuje s kolejnicí a je zdrojem vlastního zpětného trakčního proudu. Popsaná zapojení vozových rezistorů (obrázky 16 a 17) zobrazují pouze ochranné uzemnění vozu. V následujících odstavcích tyto zapojení doplním pracovním uzemněním. Společně pak budou tvořit různé verze ochranného a pracovního uzemnění.

V modelu jsem jako zdroj použil regulovaný zdroj proudu, který se přes rezistory zapojil na určitá místa vozu. Rezistory, které jsou za zdrojem, reprezentují vodivost jednotlivých měděných propojení (kabely a šíny).

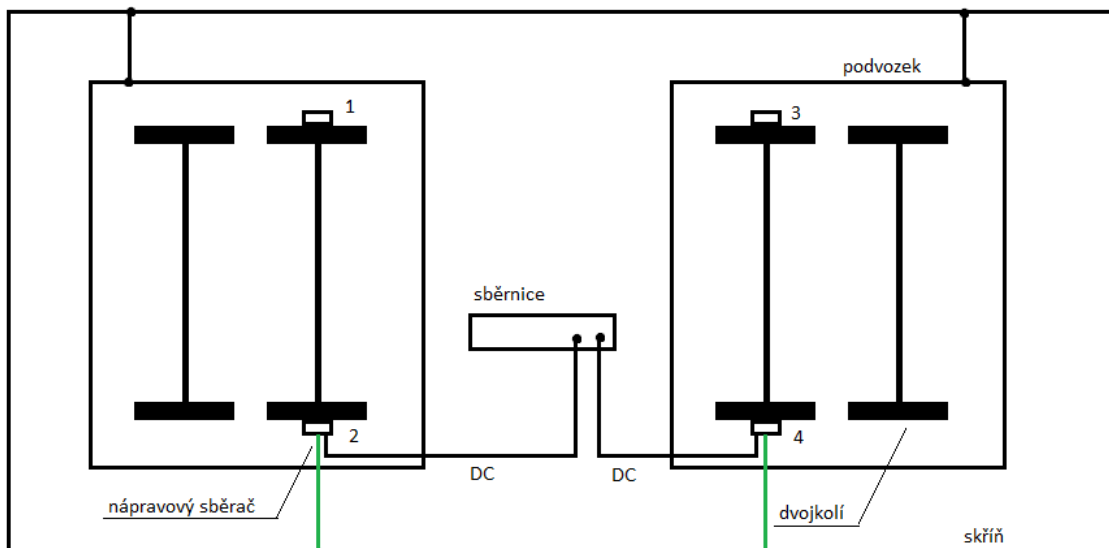
Důležité je, že velikost a směr jednotlivých přírůstků zpětného trakčního proudu vozem jsou silně závislé na místech spojení ochranného a pracovního vedení. Z tohoto důvodu jsem simuloval několik případů, které se lišily místem spojení (obrázky číslo 18, 19 a 20). Pro případ stejnosměrného napájení je charakteristické připojení neživé části na čtyři nápravové sběrače (viz obrázek číslo 18). Je to z důvodu nutnosti rozdělení většího zpětného trakčního proudu, než je tomu u střídavého napájení. Ve střídavě napájené trakci jsou proto neživé části připojeny jen na dva nápravové sběrače 1 a 3 (spoje AC/DC). Čelní vozy jsou dlouhé 25,735 m, ostatní vozy 24,175 m.

**Verze A:** V prvním případě jsem spojení pracovního a ochranného vedení simuloval na sběrnici, umístěné za zdrojem zpětného trakčního proudu. Následně jsem ze sběrnice vyvedl čtyři propojení na nápravové sběrače vnitřních dvojkolí s čísly 1 až 4 ([modré a černé spoje](#)).



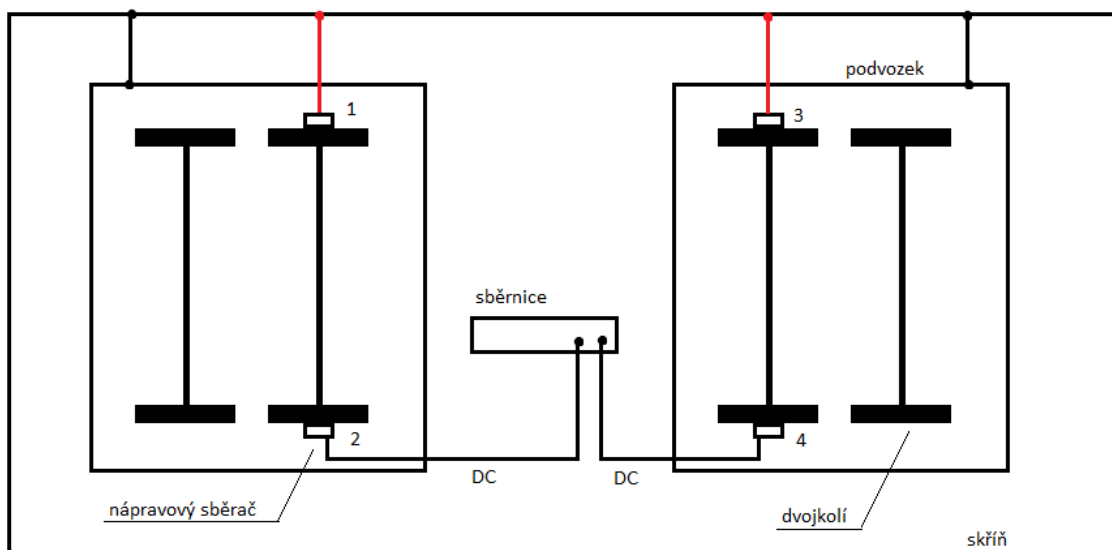
Obrázek 18 - Pracovní a ochranné propojení – Verze A

**Verze B:** Druhý případ simuloval spojení pracovní a ochranné části až na samotném nápravovém sběrači číslo 2 a 4 (zelené a černé spoje). Rozdíl byl především v eliminaci přídavných rezistorů v ochranném vedení, které bylo připojeno přímo na sběrač. Na druhou stranu byly nestandardně použity jen dva společné sběrače 2 a 4.



Obrázek 19 - Pracovní a ochranné propojení – Verze B

**Verze C:** Třetí případ se od druhého případu lišil pouze tím, že ochranné propojení bylo vyvedeno na samostatné nápravové sběrače s číslem 1 a 3 (červené a černé spoje).



Obrázek 20 - Pracovní a ochranné propojení – Verze C



### 3.3 Simulace modelu

Hlavním cílem bylo vytvoření modelu vysokorychlostního vlaku v programu Matlab Simulink R2016b. Samotný model, který se skládá z osmi vozů, tj. jedné soupravy, je doplněn o blok (Řízený zdroj) simulující zpětné trakční proudy od okolní trakce. Vstupní hodnoty (vyjma hodnot rezistorů) tvoří jak zmíněný proud od okolní trakce, tak velikost proudu, který vytváří samotná jednotka. Hodnoty zpětného trakčního proudu jednotky jsem určil ze znalosti maximálního možného výkonu při střídavém nebo stejnosměrném napájení. Pro napájení AC 25 kV, 50 Hz je limitující proud 320 A, pro DC 3 kV je limitující proud 1 400 A na celou osmivozovou jednotku.

Před samotnou simulací je tedy nutné v mfile.m zadat proměnnou „zp“, reprezentující proud jednotky a „zpo“, reprezentující velikost zpětného trakčního proudu od okolní trakce.

Byť je model vytvořen podle předlohy jako vícesystémová jednotka, pro své modelové případy jsem využil pouze jízdu vlaku po DC 3 kV trati. Je to z důvodu nejkritičtějšího případu jízdy z hlediska velikosti proudů. U soustavy DC 1,5 kV by byly proudy samozřejmě vyšší, ale v dnešní době se pro hlavní tratě v zásadě nepoužívá. Modelovou stejnosměrnou trať jsem uvažoval jako ideální, dokonale izolovanou a tím pádem bez vlivu kolejového podloží (okolní země). Podobně jsem uvažoval i při návrhu parametrů jednotlivých vozů (vozových rezistorů), kde jsem elektrické parametry reprezentoval pouze odporovou složkou. Kapacitní a induktivní vazby jsem určil jako minoritní.

Velikost a směr zpětného trakčního proudu je silně závislá na vzájemném propojení pracovního a ochranného uzemnění. Tři případy jejich vzájemného propojení jsem popsal v předešlé kapitole. V modelu jsem jednotlivá propojení realizoval za pomoci vypínačů, které vždy sepnuly požadovanou kombinaci. Uživatel si před začátkem simulace může jednotlivá zapojení volit za pomoci proměnných „verza“ pro verzi A, „verzb“ pro verzi B a „verzc“ pro verzi C (viz kapitola 3.2.3 Pracovní a ochranné uzemnění podvozku). Zvolení požadované verze je za pomoci čísla 1. Ostatní verze pak musí být nastaveny na 0. Velikosti rezistorů kolejnic jsou vypočteny ze znalosti odporu  $32,5 \mu\Omega/\text{m}$  kolejnice typu UIC60 a její následné paralelní kombinace. Schéma celého modelu je uvedeno v příloze této práce.

### 3.3.1 Popis subsystémů

Jednotlivé typy vozů jsou modelovány pomocí rozdílných subsystémů. V celé soupravě se nachází tři druhy vozů, a to typ DC, typ AC a typ A. Nejprve zde popíši jednotlivé vstupy a výstupy subsystémů a následně se zaměřím na typy vozů.

Vůz typu A je vybaven pouze kolejnicovým („Kolejnice“) a mezivozovým („Propojení vozů“) propojením, protože nedisponuje žádným zdrojem zpětného trakčního proudu. Vozy typu AC a DC mají kromě kolejnicových a mezivozových propojení i vstup pro zadanou hodnotu zpětného trakčního proudu soupravy („Zpětný proud“) a zpětného trakčního proudu od okolní trakce („-“).

Všechny vozy mají společnou základní koncepci, která vychází z již uvedeného rezistorového schéma vagonu a kolejnic. Vozy typu A jsou tažené a to znamená, že nedisponují žádným hnacím ústrojím. Tím pádem jsou vybaveny pouze daným rezistorovým schématem. Jejich umístění je uprostřed celé soupravy.

Typ DC reprezentuje vůz s výkonovým měničem a hnacími motory. Výkonový měnič, který se podílí na generaci zpětného trakčního proudu je modelován za pomoci řízených zdrojů proudu, které mají dva vstupní parametry. Na první vstup je přiveden konstantní signál velikosti zpětného trakčního proudu, odpovídající zadané hodnotě. Na druhý vstup je přiveden proud od okolní trakce uzavřeného kolejnicového obvodu.

Řízený výstupní proud je následně rozveden po vozu měděnými kabely s určitými délkami, které reprezentují zvolené rezistory.

Vůz typu AC disponuje výkonovým transformátorem. V případě jízdy na střídavě napájené trati vytváří zpětný trakční proud, který je přes ukolejňenou část vinutí dále rozváděn (viz obrázek 15). V tomto případě řízený zdroj proudu představuje popisovanou vlastnost transformátoru. Rozdíl oproti vozu DC je v měděných propojeních na výstupu řízeného zdroje proudu. Spoje se liší jak délkou a průřezem, tak i vyvedením pouze na dva nápravové sběrače.

Modifikované zapojení je modelováno současně se základní variantou. Složení subsystémů je totožné až na doplněný rezistor  $R_{\text{doplňkový}}$  a odpojení podvozků od nápravových sběračů.

## 3.4 Výsledky simulací

Obsahem následující kapitoly budou naměřené výsledky, které vzešly ze simulací modelu vysokorychlostního vlaku. Model je vytvořen univerzálně a tím pádem je na něm možné simulovat různé kritické situace. V mé diplomové práci jsem simulované situace musel zúžit na pár nejpodstatnějších a nejkritičtějších. Z tohoto důvodu jsem stanovil pro všechny simulace velikost zpětného trakčního proudu od okolní trakce na 2 000 A.

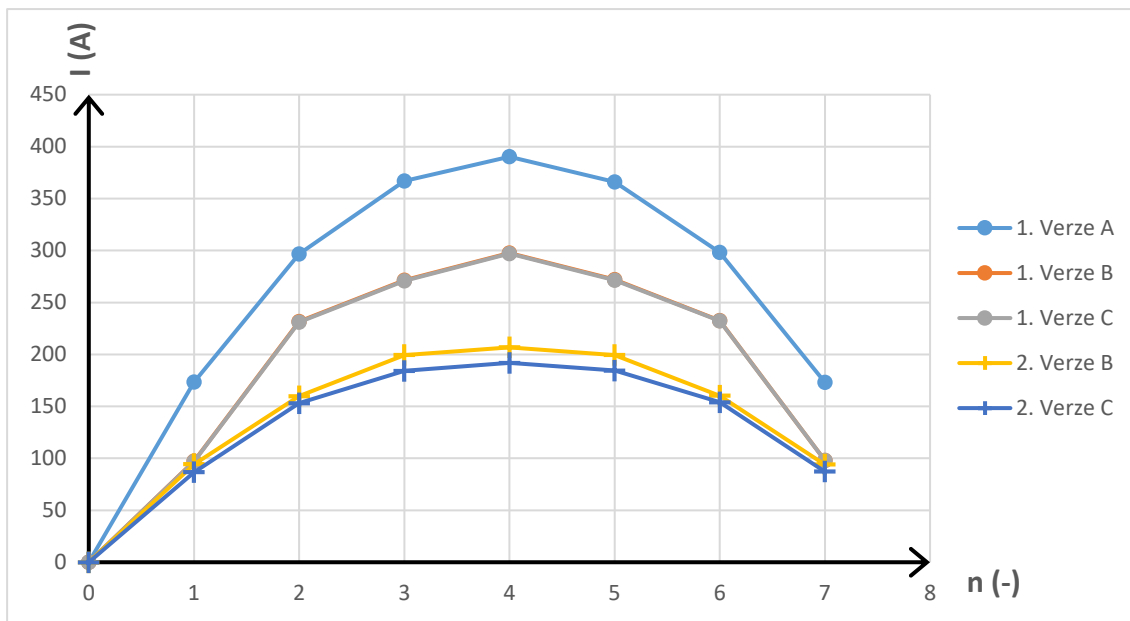
Jako první se zaměřím na podélné proudy mezi vozy a na podélné proudy kolejnicemi. V obou případech využiji k porovnání různé verze propojení ochranného a pracovního uzemnění. Dále se zaměřím na velikosti a směry proudů nápravovými sběrači a ohodnotím případné kritické případy. Velmi citlivou součástí celého rezistorového schéma je  $R_{skříň}$  jak na výkonové dimenzování, tak na omezování podélných proudů. Z těchto důvodů se zaměřím na porovnání odporu a výkonu  $R_{skříň}$  v závislosti na nutnosti vyššího dimenzování vlakových propojení.

### 3.4.1 Vozové propojení

Obsahem prvních dvou grafů je změna velikosti elektrického proudu na jednotlivých mezivozových propojení. Pro názornost jsem modeloval dva kritické případy, a to pro minimální zpětný trakční proud samotné soupravy a pro maximální možný proud soupravy. Pro DC 3 kV trať jsem uvažoval minimální hodnotu proudu 20 A (vlak stojí bez zapnuté klimatizace) a maximální hodnotu 1 400 A při jízdě.

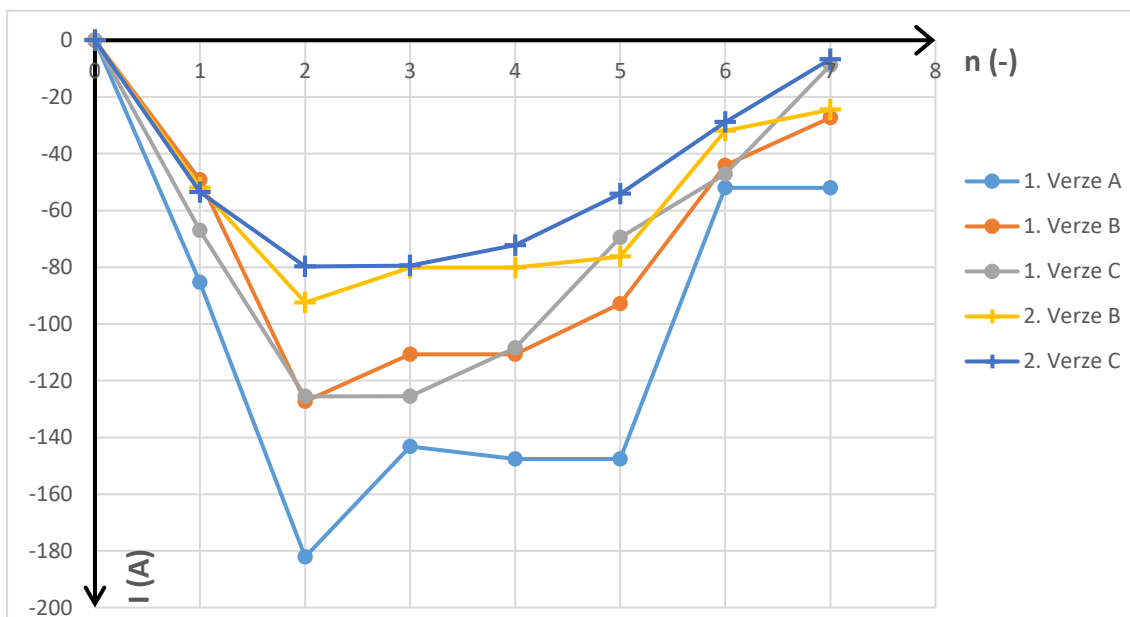
Obě proudové hladiny jsem simuloval pro různé verze zapojení ochranného a pracovního uzemnění (Verze A, Verze B, Verze C). Označení „1. Verze A“ reprezentuje výsledky nemodifikovaného zapojení (3.2.1) rezistorů ve verzi zapojení „A“. Označení „2. Verze A“ reprezentuje modifikované zapojení (3.2.2) rezistorů ve verzi zapojení „A“.

Na ose „x“ jsou vynesena čísla propojení a to tak, že například  $n = 1$  definuje mezivozové propojení vozů číslo 1 a 2. Na ose „y“ jsou vyneseny simulované proudy.



Graf 1 - Elektrický proud vozovým propojením - 20 A

Nejvyšší elektrický proud jsem zaznamenal v základní, nemodifikované, variantě v zapojení verze „A“ mezi čtvrtým a pátým vozem a to 390 A. Oba dva vozy jsou bez hnacích motorů.



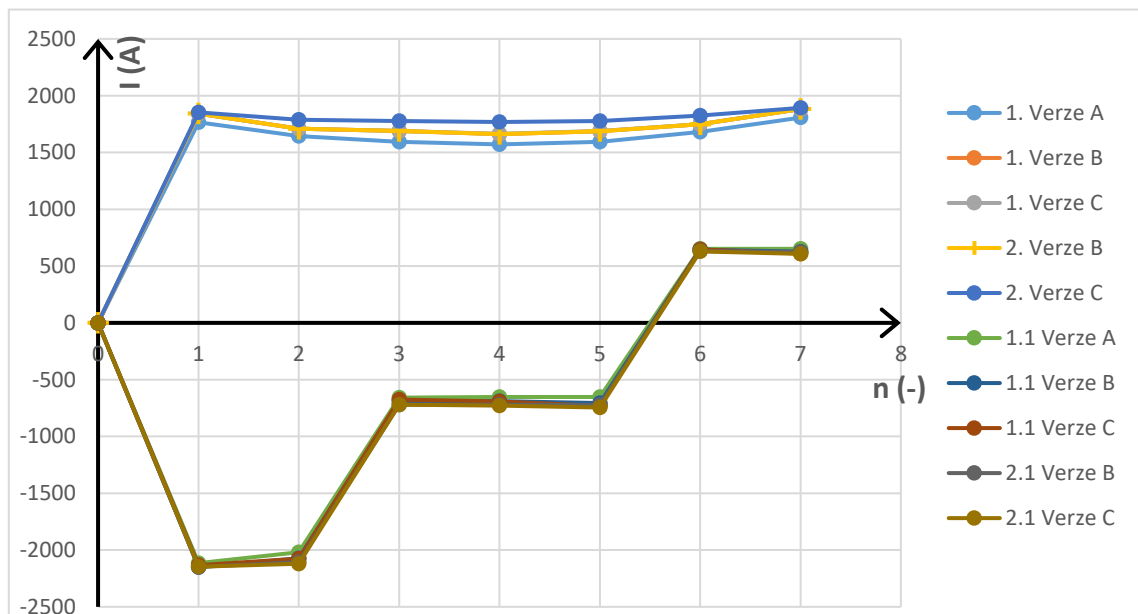
Graf 2 - Elektrický proud vozovým propojením - 1 400 A

V grafu číslo 2 se vyskytují záporné hodnoty proudů. Je to z toho důvodu, že kladné hodnoty značí směr proudu od prvního vozu k poslednímu a záporné hodnoty směr proudu od posledního vozu k prvnímu. Nejvyšší hodnota proudu byla odečtena mezi druhým a třetím vozem s velikostí 182 A.

### 3.4.2 Kolejnicové propojení

Vedle znalosti proudů mezivozovým propojením jsem usoudil jako podstatnou simulaci kolejnicových proudů. Pro názornost jsem odečetl simulované kolejnicové proudy mezi jednotlivými vozy. Opět jsem uvažoval dvě kritické hodnoty zpětného trakčního proudu soupravy 20 A, 1 400 A. Z důvodu zpřehlednění simulovaných výsledků jsem obě nastavení proudu vynesl do jednoho grafu.

Naměřené hodnoty s označením „1.“ a „2.“ jsou při nastavení 20 A, hodnoty s označením „1.1“ a „2.1“ jsou při proudu 1 400 A. Označení os grafu je totožné s grafy číslo 1 a 2.



Graf 3 - Elektrický proud kolejnicí - 20 A, 1 400 A

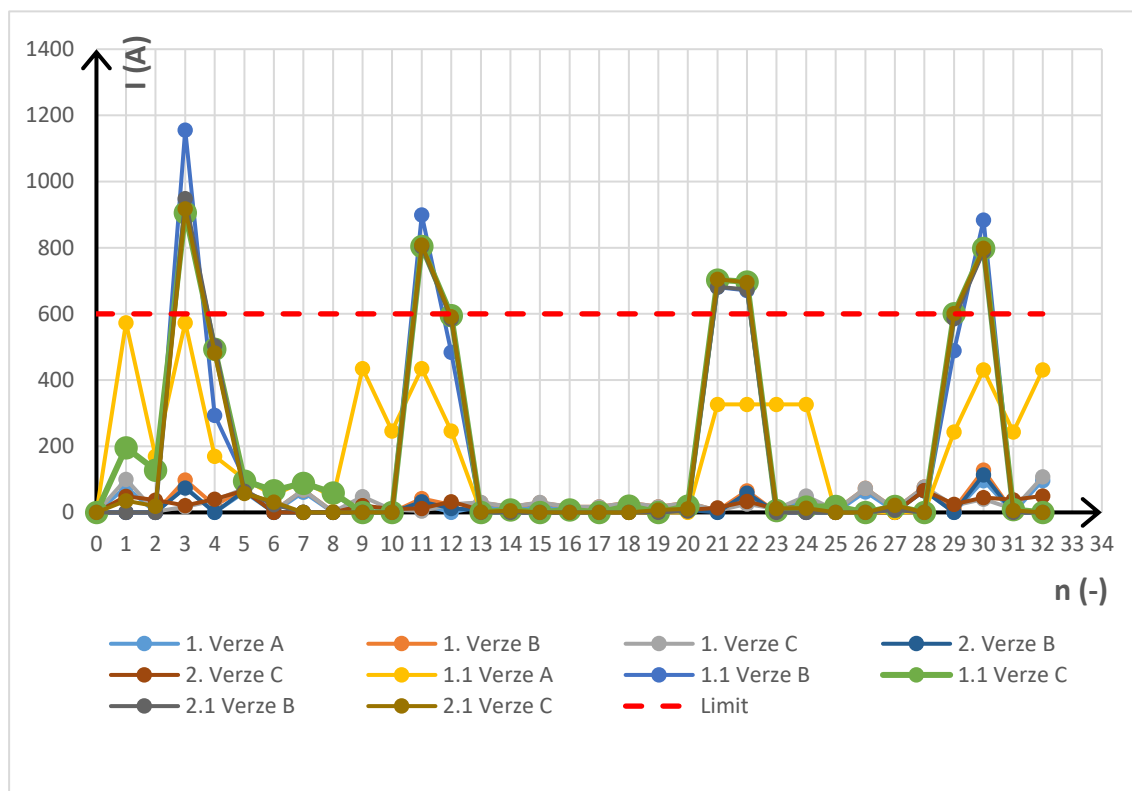
I v tomto případě záporné hodnoty proudu charakterizují směr od posledního vozu k prvnímu. V případě nastavení hodnoty 20 A zpětného trakčního proudu soupravy vychází ze simulace maximální zpětný trakční proud kolejnicí do hodnoty 2 000 A. Ve chvíli přenastavení proudu na 1 400 A (jízda) se maximum posunulo za hranici 2 000 A (konkrétně 2 146 A při 2.1 Verze C).

Z dosud uvedených grafů lze vyvodit fakt, že v případě modifikovaného zapojení rezistorů (3.2.2) je model schopen lépe směřovat zpětný trakční proud kolejnicí. Tím pádem nedochází k tak velkým tokům proudu přes skříně vozů.

### 3.4.3 Nápravové sběrače

Teoretický rozbor nápravových sběračů jsem uvedl v kapitole 2.3.2. Konkrétně jsem se zaměřil na nápravový sběrač od firmy Stemmann technik, který má výrobcem definovány maximální hodnoty proudu. Konkrétně tento typ, který se používá u lokomotiv, má maximální hodnotu proudu 600 A, popřípadě 900 A po dobu maximálně 5 minut. Dále je uveden přechodový odpor v rozmezí 5 – 20 mΩ.

Před samotným rozбором simulovaných výsledků bych chtěl zmínit výrobcem definované rozmezí přechodového odporu nápravového sběrače. Pro můj model jsem použil hodnotu odporu sběrače 200 μΩ. Tato hodnota byla změřena na voze metra M1. Kdybychom vzali v úvahu deklarovanou hodnotu 20 mΩ, tak se při průchodu proudu 600 A dostaneme na výkon 7,2 kW. Hodnota 7,2 kW na jednom nápravovém sběrači by byla silně destruktivní. Z tohoto důvodu jsem, i přes poskytnuté údaje od výrobce, bral v úvahu reálných 200 μΩ.

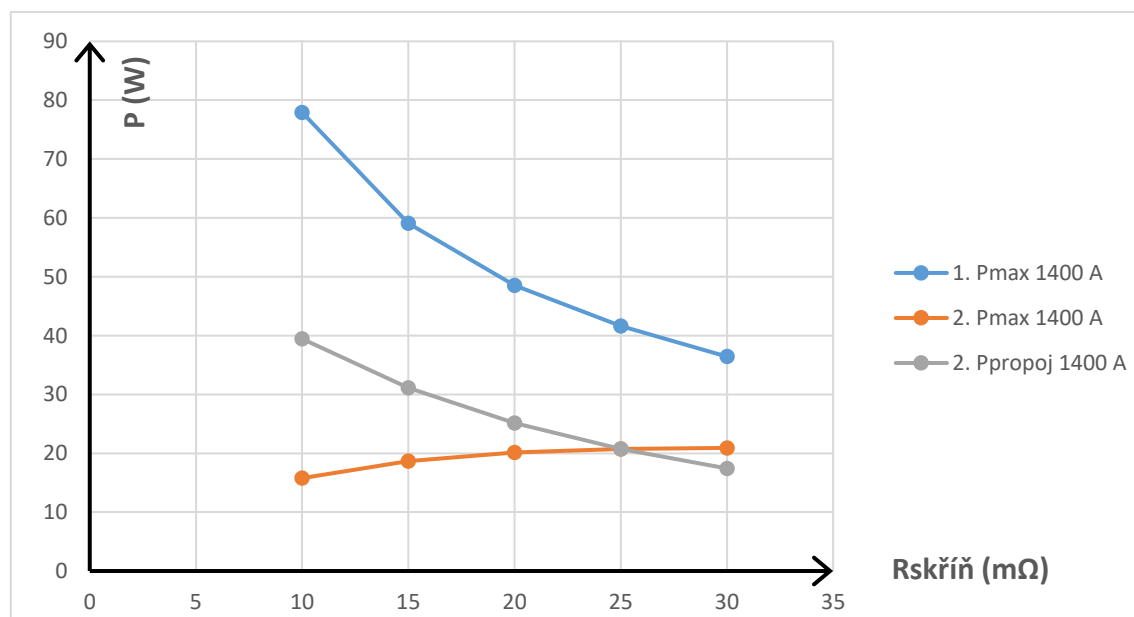


Graf 4 - Elektrický proud nápravovým sběračem - 20 A, 1 400 A

Červená limitní hranice představuje maximální hodnotu zpětného proudu nápravovým sběračem 600 A. Kladné hodnoty proudu udávají směr proudu do vozidla. Jak je patrné z grafu číslo 4, uvedenou maximální hodnotu nespĺňuje zapojení 1.1 verze B a C, 2.1 verze B a C. Obě verze jsou simulovány při zpětném trakčním proudu soupravy 1 400 A. Mohu tedy usoudit, že by se vozidlo při maximálním možném výkonu 4 200 kW na dráze nemohlo provozovat.

### 3.4.4 Výkonové dimenzování rezistoru $R_{skříň}$

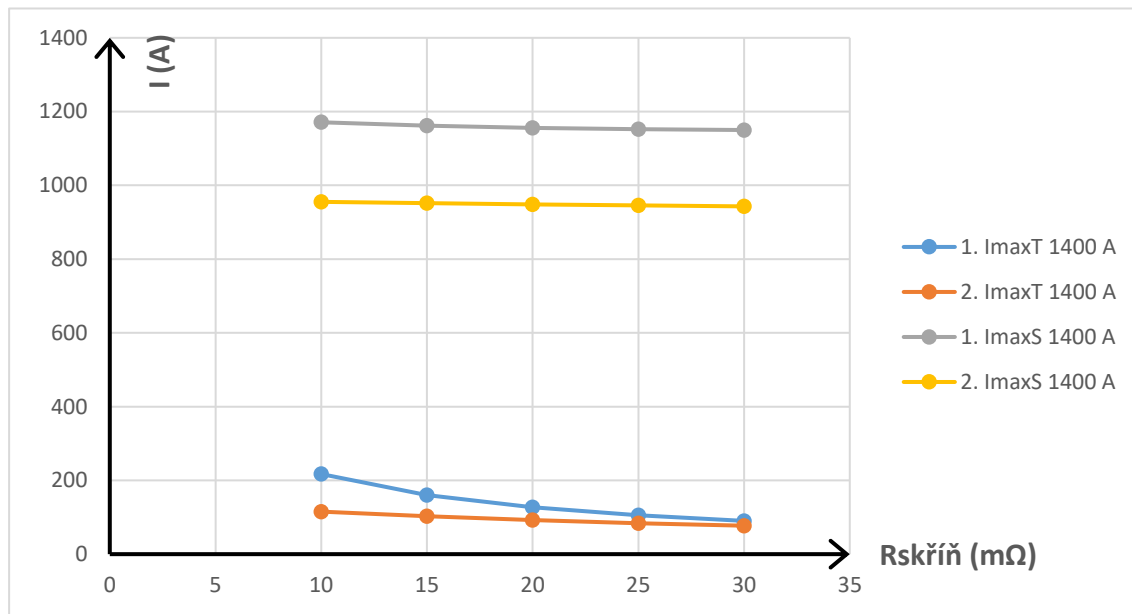
V posledním vyhodnocení jsem se zaměřil na výkonové dimenzování vloženého rezistoru  $R_{skříň}$  v závislosti na jeho odporu. Vyjma simulování výkonu jsem pro dané hodnoty rezistoru porovnával změnu maximálního proudu mezi vozy a nápravovým sběračem. Graf číslo 5 je simulován pro zpětný trakční proud soupravy 1 400 A.



Graf 5 - Změna výkonu rezistoru v závislosti na jeho velikosti

Simulovaná charakteristika „1.  $P_{max}$ “ zobrazuje výkon  $R_{skříň}$  první, nemodifikované varianty (3.2.1). Charakteristika „2.  $P_{max}$ “ zobrazuje výkon za modifikované varianty (3.2.2). Součástí modifikované varianty je rezistor  $R_{doplňkový}$  o odporu 35 m $\Omega$ . Tento rezistor vykazoval větší výkonovou ztrátu ( $P_{propoj}$ ) než samotný  $R_{skříň}$  modifikované varianty.

Grafická závislost číslo 6 vykresluje maximální hodnoty proudů mezivozovým propojením a nápravovými sběrači v závislosti na změně rezistoru  $R_{skříň}$ .



Graf 6 - Změna proud nápravovými sběrači a mezivozového propojení v závislosti na  $R_{skříň}$

Uvedené křivky s koncovým označením „T“ uvádí hodnoty proudů mezivozového propojení, s označením „S“ uvádí hodnoty proudů nápravovými sběrači. Z výsledných proudových hodnot nápravových sběračů je opět patrná nevhodnost použití soupravy pro provoz na DC 3 kV trati. Ze simulace jsem zjistil, že by se souprava mohla provozovat pouze za předpokladu maximálního zpětného trakčního proudu soupravy 650 A. V tu chvíli by velikosti proudů byly vyhovující.



## Závěr

V teoretické části diplomové práce jsem popsal nejčastěji používané systémy elektrického napájení železnic a porovnal jejich výhody a nevýhody. Následně jsem přešel k problematice cesty elektrického proudu vozem, která začíná trolejovým sběračem a končí nápravovým sběračem proudu. Z hlediska vedení zpětného trakčního proudu z vozidla jsem se zaměřil v kapitole „2.4 Mechanika trakčního vedení a kolejnice“ především na kolejnicový a trolejový systém. Tím jsem se dopracoval k vedení zpětných trakčních proudů jak na straně dopravní cesty, tak na straně vozidla. V závěru teoretické části jsem nastínil téma interoperability železničních systémů v Evropě.

Praktická část měla v úvodu za cíl podrobnější rozbor problematiky zpětných trakčních proudů. Hlavní částí bylo vytvoření matematického modelu vlakové soupravy pro simulování zpětných trakčních proudů v programu Matlab Simulink R2016b. Samotný model se skládal ze dvou různých rezistorových zapojení a ze třech různých verzí ochranného a pracovního propojení uzemnění vozu. Úlohou simulování bylo určení směrů a velikostí zpětných trakčních proudů při jízdě vlakové soupravy o výkonu 4,2 MW na ideální stejnosměrné 3 kV trati.

Prioritním poznatkem bylo zjištění, že zpětný trakční proud svou velkou částí protéká přes vozidlo. Tím může docházet k poškození nejcitlivějších částí vozu. Simulovanými případy jsem zjistil, že nekritičtější částí vlaku na poškození zpětnými proudy jsou nápravové sběrače. Ze simulovaných výsledků je patrné, že verze A (3.2.3) zajišťovala rovnoměrné rozdělení proudu na všechny nápravové sběrače. Díky tomu byla jako jediná vyhovující pro splnění mezního proudu 600 A, který udává výrobce nápravového sběrače. Verze B (3.2.3) byla ovšem úplným opakem. Sice zajistila menší hodnotu elektrického proudu přes mezivozové propojení, ale velikost zpětného trakčního proudu přes nápravový sběrač byla v případech 1.1 verze B, 2.1 verze B vysoko nad maximálním limitem 600 A (až 1 156 A). U verze C jsem se v případech 1.1 verze C, 2.1 verze C také setkal s nevyhovujícími hodnoty proudů při maximálním výkonu soupravy.

Velikost proudů přes nápravové sběrače lze ovlivnit vhodným dimenzováním vnitřních vozových rezistorů. Především se jedná o rezistory  $R_{skříň}$  a  $R_{doplňkový}$ . Z grafické závislosti číslo 6 vyplývá, že při zvýšení odporu těchto

rezistorů se sníží proud nápravovými sběrači. Na druhou stranu je nutné sledovat požadavek na vyšší výkonové dimenzování rezistorů při vzrůstu hodnoty odporu. U nemodifikované varianty (3.2.1) jsem zaznamenal větší vzrůst výkonu rezistoru  $R_{skříň}$  než u modifikované varianty (3.2.2) s rezistorem  $R_{doplňkový}$  (viz graf číslo 5).

Za další citlivou část jsem považoval mezivozové propojení. Ze simulovaných výsledků mohu určit, že z hlediska modelu rezistorového zapojení vozu byla vhodnější modifikovaná koncepce s rezistorem  $R_{doplňkový}$ . Zpětný trakční proud neměl takové tendence k toku přes vozy. Maximální hodnota simulovaného elektrického proudu na mezivozovém propojení byla u modifikované varianty 192 A, oproti nemodifikovanému zapojení s maximální hodnotou 390 A.

Vlaková vysokorychlostní souprava s parametry, které jsem si pro modelový případ zvolil vyhovuje při maximálním výkonu provozu na DC 3 kV trati v případě zapojení ochranného a pracovního uzemnění ve verzi A, protože proudy nápravovými sběrači vyhovují maximálnímu proudovému omezení (viz graf číslo 4). Ostatní verze B a C vykazují při maximálním odebíraném proudu 1 400 A nadlimitní proudy nápravovými sběrači, a proto nejsou vyhovující.

# Seznam zdrojů

## Zdroje

- [1] POHL, Jiří. *Prezentace Napájení elektrických drah*
- [2] DOLEČEK, Radovan a Ondřej ČERNÝ. *Trakční napájecí soustavy* [online]. Univerzita Pardubice
- [3] ŠVESTKA, David. *Typy sběračů* [online]. [cit. 2016-12-03]. Dostupné z: <http://www.atlaslokomotiv.net/page-sberace.html>
- [4] ČSN 36 2324: Nápravové sběrače proudu
- [5] PLÁŠEK, Otto, Pavel ZVĚŘINA, Richard SVOBODA a Vojtěch LANGER. *Železniční stavby III* [online]. [cit. 2016-12-03]. Dostupné z: <http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BN02-Zeleznicni%20stavby%20II/M03-%C5%BDelezni%C4%8Dn%C3%AD%20svr%C5%A1ek%20%20kolejnice.pdf>
- [6] *Zabezpečovací technika v dopravě* [online]. [cit. 2016-12-17]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/147/15.html>
- [7] ČSN EN 50149 ed. 2: Profilový trolejový vodič z mědi a slitin mědi.
- [8] PELÍŠEK, Michal. *Trakční vedení* [online]. [cit. 2017-02-06]. Dostupné z: <http://www.strojvedouciplzen.cz/index.php?page=menu&id=79>
- [9] *NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) č. 1301/2014 o technické specifikaci pro interoperabilitu subsystému energie železničního systému v Unii* [online]. [cit. 2017-02-08]. Dostupné z: [http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=uriserv:OJ.L\\_.2014.356.01.0179.01.CES](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2014.356.01.0179.01.CES)
- [10] VÝKRUTA, Vladivoj. *Vedení zpětného trakčního proudu* [odborný článek]. *Nová železniční technika*, Roč. 18, č. 1 (únor 2010).

- [11] SCHRAMKE, Ellen. *Siemens Velaro* [online]. [cit. 2017-02-15].  
Dostupné z:  
<http://www.siemens.com/press/pool/de/events/2012/infrastructure-cities/rail-systems/2012-12-velaro/background-velaro-worldwide-e.pdf>
- [12] HODAS, Pavel. *Podélné zpětné proudy kolejovými vozidly* [přednáška]. [cit. 2017-03-10].
- [13] Pantograf [cit. 2016-12-03]., Dostupné z:  
<http://www.atlaslokomotiv.net/page-sberace.html>
- [14] Polopantograf Stemmann technik. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z:  
[http://www.stemmann.com/documents/catalogues/st\\_railway\\_technology\\_systems.pdf](http://www.stemmann.com/documents/catalogues/st_railway_technology_systems.pdf)
- [15] Nápravový sběrač proudu Stemmann technik. [cit. 2017-05-04].  
Dostupné z:  
[http://www.stemmann.com/documents/catalogues/st\\_frost\\_ground\\_contacts.pdf](http://www.stemmann.com/documents/catalogues/st_frost_ground_contacts.pdf)
- [16] Velaro D (Class 407). [cit. 2017-03-30]. Dostupné z:  
[https://www.google.cz/search?q=velaro+d&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwi859Hprv7SAhXCGCwKHeNZDgoQ\\_AUIBigB&biw=1920&bih=947#imgsrc=JUFGR7XIlzRA1M](https://www.google.cz/search?q=velaro+d&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwi859Hprv7SAhXCGCwKHeNZDgoQ_AUIBigB&biw=1920&bih=947#imgsrc=JUFGR7XIlzRA1M)

## Seznam grafů

- Graf 1 Elektrický proud vozovým propojením – 20 A
- Graf 2 Elektrický proud vozovým propojením – 1 400 A
- Graf 3 Elektrický proud kolejnicí – 20 A, 1 400 A
- Graf 4 Elektrický proud nápravovým sběračem – 20 A, 1 400 A
- Graf 5 Změna výkonu rezistoru v závislosti na jeho velikosti
- Graf 6 Změna proudu nápravovými sběrači a mezivozového propojení v závislosti na  $R_{skříň}$

## Seznam obrázků

- Obrázek 1 Schématické zapojení soustavy DC 3 kV, upraveno.  
[cit. 2016-08-03]. Dostupné z: [2],  
<http://www.vlaky.net/zeleznice/spravy/003311-Lokomotivy-rady-130-E-4790/>
- Obrázek 2 Schématické zapojení soustavy 2AC 25 kV, 50 Hz, zdroj [2]
- Obrázek 3 Úbytky napětí, zdroj [1]
- Obrázek 4 Pantograf, zdroj [13]
- Obrázek 5 Polopantograf Stemmann technik, zdroj [14]
- Obrázek 6 Nápravový sběrač proudu Stemmann technik, zdroj [15]
- Obrázek 7 Propojení izolovaných kolejnic, zdroj [6]
- Obrázek 8 Trolejový vodič AC-80, zdroj [7]
- Obrázek 9 Řetězovkové vedení se závažím, zdroj – vlastní foto
- Obrázek 10 Napájecí soustavy, zdroj [2]
- Obrázek 11 Průběh napětí na kolejnicích, zdroj [10]
- Obrázek 12 Způsob ochrany okolních systémů DC tratí, zdroj – vlastní
- Obrázek 13 Aktivní zpětný vodič – princip funkce, zdroj – vlastní
- Obrázek 14 Velaro D (Class 407), zdroj [16]
- Obrázek 15 Schéma vícesystémové jednotky, zdroj – vlastní
- Obrázek 16 Rezistorové schéma vozu, zdroj – vlastní
- Obrázek 17 Modifikované zapojení rezistorů vozu, zdroj – vlastní
- Obrázek 18 Pracovní a ochranné spojení – Verze A, zdroj – vlastní
- Obrázek 19 Pracovní a ochranné spojení – Verze B, zdroj – vlastní
- Obrázek 20 Pracovní a ochranné spojení – Verze C, zdroj – vlastní

## Seznam tabulek

- Tabulka 1 Minimální střední užitečné napětí na sběrači, zdroj [9]
- Tabulka 2 Dovolena dotyková napětí, zdroj [2]
- Tabulka 3 Příklad parametrů vysokorychlostní jednotky, zdroj [11]
- Tabulka 4 Seznam vozových rezistorů, zdroj [12]

## Seznam vzorců

- Vzorec číslo 1                      Vzdálenost měření, zdroj [1]
- Vzorec číslo 2                      Elektrický odpor kolejnice UIC60
- Vzorec číslo 3                      Součet zpětných proudů, zdroj [10]
- Vzorec číslo 4                      Elektrický odpor propojení

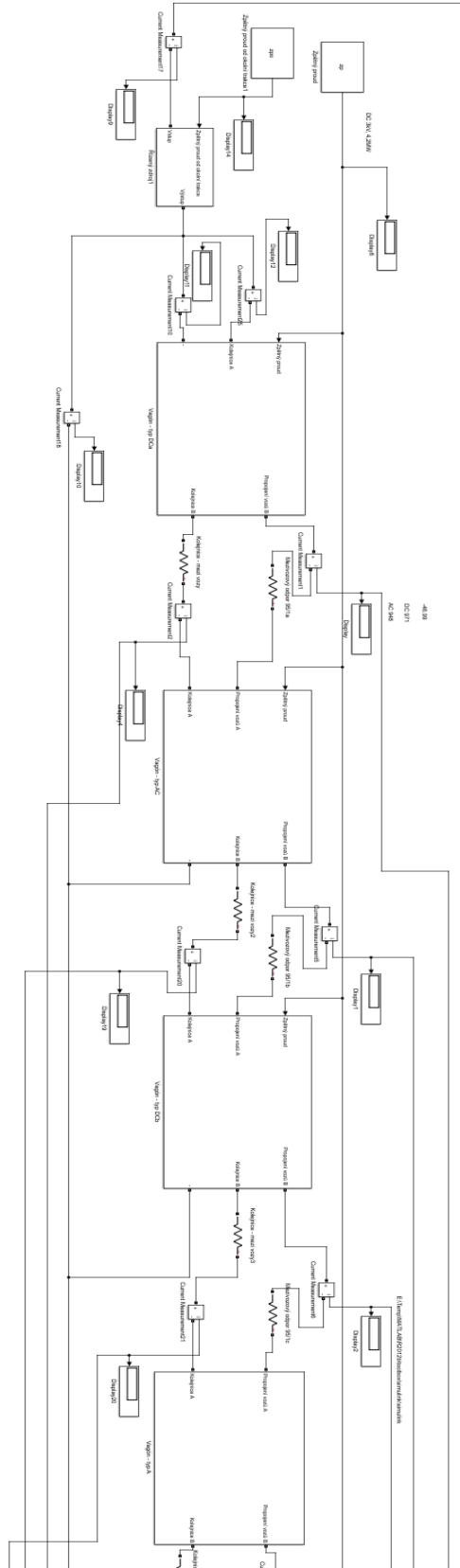
## Seznam použitých zkratk

- kV = kilovolt  
kA = kiloampér  
ms = milisekunda  
 $\Omega$  = ohm  
kW/t = výkon za čas  
Hz = Hertz  
N = Newton – síla  
AC = střídavý elektrický proud  
DC = stejnosměrný elektrický proud  
W = Watt – výkon  
g = gravitační přetížení

# Přílohy

## Část zapojení matematického modelu vlakové soupravy

a) První čtyři vozy soupravy



## b) Zapojení vozových rezistorů vozu typu „DC“

