

Bibliografická citace práce:

Svoboda, O. *Návrh elektrizace jednokolejné trati*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2019. 103 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D..

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Návrh elektrizace jednokolejné trati* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č.121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: 22.5.2019

.....



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**
Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Ondřej Svoboda

ID: 164409

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Návrh elektrizace jednokolejné trati

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Provést rešerši problematiky napájení trakčních soustav
2. Vytvořit model infrastruktury zadaného úseku (koleje, zab. zař, stanice zastávky) v programu OpenTrack
3. Vytvořit dopravní model v programu OpenTrack
4. Návrh stejnosměrného napájení DC 3kV v programu OpenPowerNet
5. Návrh střídavého napájení AC 25 kV 50 Hz v programu OpenPowerNet
6. Ekonomické srovnání nákladů a údržby v časovém úseku 30 let

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 22.5.2019

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Hlavním tématem diplomové práce je návrh elektrizace jednokolejné trati stejnosměrnou proudovou soustavou 3 kV a střídavou proudovou soustavou 5 kV 50 Hz a poté ekonomicky zhodnotit v časovém období 30-ti let. Práce pojednává o základních trakčních soustavách a také se věnuje výpočtu hlavních parametrů elektrických vlakových souprav. V práci je detailně popsán postup při návrhu elektrizace tratě a částečné seznámení se simulačními programy, které byly využity pro energetické výpočty.

KLÍČOVÁ SLOVA:

trakce; vlaky; stejnosměrná trakční proudová soustava; střídavá trakční proudová soustava; OpenPowerNet; OpenTrack; úbytek napětí; dotykové napětí; ztráty; výkonové zatížení;

ABSTRACT

The main topic of the thesis is the design of single-track electrification of a direct current system of 3 kV and an alternating current system of 5 kV 50 Hz and then economically evaluate it over a period of 30 years. The work deals with basic traction systems and also deals with the calculation of main parameters of electric trains. The thesis describes in detail the procedure for the design of the electrification of the track and a partial introduction to the simulation programs that were used for energy calculations.

KEY WORDS:

traction; trains; DC traction current system; AC traction current system; OpenPowerNet; OpenTrack; voltage drop; touch voltage; losses; power load;

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiří Drápela, Ph.D. za podnětné návrhy k práci, účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc během vypracovávání diplomové práce.

V Brně dne: 22.5.2019

Podpis autora.....

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	10
1 ÚVOD	11
2 VÝPOČET MĚRNÉ ENERGIE PRO TRAKCI.....	13
3 TRAKČNÍ PROUDOVÉ SOUSTAVY	19
4 STEJNOSMĚRNÁ PROUDOVÁ SOUSTAVA	21
4.1 NAPÁJENÍ ELEKTRICKÝCH DRAH STEJNOMĚRNÉ PROUDOVÉ SOUSTAVY	21
4.2 VÝPOČET ÚBYTKU NAPĚTÍ STEJNOSMĚRNÉ PROUDOVÉ SOUSTAVY	24
4.3 ZKRATOVÉ PROUDY STEJNOSMĚRNÉ PROUDOVÉ SOUSTAVY	37
5 STŘÍDAVÁ PROUDOVÁ SOUSTAVA	38
5.1 VÝPOČET ÚBYTKU NAPĚTÍ STŘÍDAVÉ PROUDOVÉ SOUSTAVY	39
5.2 KONTROLA OTEPLENÍ VODIČŮ.....	45
5.3 ZKRATOVÉ PROUDY STŘÍDAVÉ PROUDOVÉ SOUSTAVY	45
6 ENERGETICKÉ ZTRÁTY TRAKČNÍHO VEDENÍ.....	47
7 INFRASTRUKTURA VÝPOČETNÍHO MODELU	49
7.1 OPENTRACK - VÝPOČETNÍ MODEL	52
8 NÁVRH NAPÁJENÍ STEJNOSMĚRNOU PROUDOVOU SOUSTAVOU	56
9 OPENPOWERNET – STEJNOSMĚRNÉ NAPÁJENÍ.....	59
9.1 VSTUPNÍ DATA.....	59
9.1.1 PARAMETRY DC SÍTĚ.....	60
9.1.2 PARAMETRY TRAKČNÍCH MĚNÍREN (TM)	60
9.1.3 PARAMETRY TRAKČNÍHO VEDENÍ.....	60
9.1.4 PARAMETRY HNACÍCH VOZIDEL	61
9.2 VÝSLEDKY SIMULACE.....	62
9.2.1 MINIMÁLNÍ NAPĚTÍ V TROLEJI	62
.....	62
9.2.2 MAXIMÁLNÍ NAPĚTÍ MEZI KOLEJÍ A ZEMÍ (DOTYKOVÉ NAPĚTÍ)	64
9.2.3 PROUDOVÁ ZATÍŽITELNOST TV A ZKRATOVÉ POMĚRY	67
9.2.4 VÝKONOVÉ ZATÍŽENÍ TM.....	69
9.2.5 STŘEDNÍ UŽITEČNÉ NAPĚTÍ OBLASTI A VLAKU	69
10 NÁVRH NAPÁJENÍ STŘÍDAVOU PROUDOVOU SOUSTAVOU 25 KV 50HZ	72
11 OPENPOWERNET –STŘÍDAVÉ NAPÁJENÍ.....	76
11.1 VSTUPNÍ DATA	76
11.1.1 PARAMETRY AC SÍTĚ.....	77

11.1.2 PARAMETRY TRAKČNÍ TRANSFORMOVNY (TT).....	77
11.1.3 PARAMETRY TRAKČNÍHO VEDENÍ.....	77
11.1.4 PARAMETRY HNACÍCH VOZIDEL	78
11.2 VÝSLEDKY SIMULACE.....	79
11.2.1 MINIMÁLNÍ NAPĚTÍ V TROLEJI	79
11.2.2 MAXIMÁLNÍ NAPĚTÍ MEZI KOLEJÍ A ZEMÍ (DOTYKOVÉ NAPĚTÍ)“	80
11.2.3 PROUDOVÁ ZATÍŽITELNOST TV A ZKRATOVÉ POMĚRY	82
11.2.4 VÝKONOVÉ ZATÍŽENÍ TT	84
11.2.5 STŘEDNÍ UŽITEČNÉ NAPĚTÍ OBLASTI A VLAKU	84
12 EKONOMICKÉ SROVNÁNÍ.....	87
13 ZÁVĚR.....	92
POUŽITÁ LITERATURA	93
SEZNAM PŘÍLOH.....	94
PŘÍLOHY	95

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 – Redukovaný podélný profil trati</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 2 – Jednostranné napájení jednokolejné trati.....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 3- Jednostranné napájení dvoukolejné trati</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 4 – Dvoustranné rozložené napájení dvoukolejné trati</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 5 – Dvoustranné napájení dvoukolejné trati s příčnými spínači</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 6 - Dvoustranné napájení dvoukolejné trati se spínací stanicí.....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 7- Jednostranné rozložení proudových odběrů.....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 8 – Dvoustranné rozložení proudových odběrů.....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 9 – Jednostranné napájení jednokolejné trati.....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 10 – Jednostranné napájení dvoukolejné trati s příčným propojením na konci.....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 11 – Dvoustranné napájení jednokolejné trati</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 12 - Dvoustranné napájení dvoukolejné trati s trolejovým vedením spojeným uprostřed úseku.....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 13 Jednostranné napájení jednokolejné trati.....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 14 - Jednostranné napájení dvoukolejné trati s trolejovým vedením na konci propojeným</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 15 - Dvoustranné napájení jednokolejné trati</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 16 - Dvoustranné napájení trati s trolejovým vedením spojeným uprostřed.....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 17- Jednostranné napájení - střídavá proudová soustava.....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 18 – Impedance.....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 19 – Vektorový diagram jednoho odběru</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 20 – Vektorový diagram dvou a více odběrů</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 21 – Vektorový diagram úbytku napětí v závislosti na účinníku.....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 22 – Redukovaný profil navrhnuté trati.....</i>	<i>49</i>
<i>Obrázek 23 – Teoretický GVD</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 24 – Zobrazení železniční stanice v dvoubodovém grafu programu OpenTrack</i>	<i>52</i>
<i>Obrázek 25 – Provozní charakteristika soupravy RegioPanter 640.....</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 26 – Provozní charakteristika lokomotivy Siemens Vectron</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 27- Výstupní GVD z programu OpenTrack</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 28 – Výsledná návrh stejnosměrného napájení</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 29 – Zapojení výsledného návrhu v programu OpenPowerNet.....</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 30 – Výsledná návrh střídavého napájení.....</i>	<i>75</i>
<i>Obrázek 31 – Zapojení střídavého modelu v programu OpenPowerNet.....</i>	<i>76</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1- Jmenovité napětí stejnosměrných trakčních soustav</i>	<i>24</i>
<i>Tabulka 2 – Polohy TM.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabulka 3 – Poloha navržených TM v programu OpenPowerNet</i>	<i>56</i>
<i>Tabulka 4 – Orientační výpočet úbytku napětí meziměřírenských úseků</i>	<i>57</i>
<i>Tabulka 5 – Proudové zatížení jednotlivých napáječů TM</i>	<i>67</i>
<i>Tabulka 6 – Porovnání zkratových poměrů</i>	<i>68</i>
<i>Tabulka 7 - Výkonové zatížení TM</i>	<i>69</i>
<i>Tabulka 8 – Střední užitečné napětí vlaku.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabulka 9 – Proudové zatížení TV – AC soustava</i>	<i>82</i>
<i>Tabulka 10 – Zkratové poměry – AC soustava.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabulka 11- Střední užitečné napětí vlaku</i>	<i>85</i>
<i>Tabulka 12 – Tabulkový jízdní diagram.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabulka 13 – Kalkulace návrhu DC soustavy</i>	<i>90</i>
<i>Tabulka 14 - Kalkulace návrhu AC soustavy</i>	<i>90</i>
<i>Tabulka 15 – Výpočet celkové spotřeby energie</i>	<i>91</i>

SEZNAM ZKRATEK

TV	trakční vedení
TM	trakční měnič
TT	trakční transformovna
GVD	Grafikon vlakové dopravy

1 ÚVOD

Všechno to začalo v roce 1879 na berlínské živnostenské výstavě, kde firma Siemens & Halske představila první elektrickou dráhu na světě. Šlo o 300 metrů dlouhý okruh, po kterém jezdila malá dvounápravová lokomotiva napájená 150 V. Ta vypadala jako obyčejná krabice, na které řidič seděl obkročmo. Za ní byla připojena trojice malých vagonů. Malý vlak byl senzací, nekouřilo se z něj, pohyboval se bez koňského spřežení a lidské síly.

Po berlínské premiéře šel vývoj elektřiny velice rychle vpřed. V roce 1881 zprovoznil Siemens & Halske první 2,5 kilometru dlouhou elektrickou trať pro tramvaj na okraji Berlína. O dalších 10 let dále svezla první elektrická tramvaj návštěvníky Jubilejní výstavy v Praze a na konci století už bylo jenom v Čechách a na Moravě okolo desítky elektrických tramvajových vozidel.

Elektřina zamířila také na železnici. První elektrifikované tratě a elektrické lokomotivy se objevily v Americe a v Evropě v 90. letech 19. století. Velmi rychle ukázala svou sílu a možnosti, když na německé vojenské dráze Marienfelde – Zossen – Juterborg upravené pro zkoušky elektrického provozu dosáhl v roce 1903 testovací vůz společnosti AEG rekord 210 km/h.

Vedle zkušebních tratí začaly po světě přibývat i běžné dráhy, na kterých byl zajištěn elektrický provoz. Za první elektrifikovanou trať je považována italská Ferrovia della Valtellina. Elektřinu tam zavedla maďarské společnost GANZ už v roce 1902. Pro napájení vlaků použila třífázový střídavý systém o napětí 3000 V s frekvencí 15,6 Hz, později upravený na 3 600 V 16 2/3 Hz a v roce 1952 byla dráha přepnuta v Itálii na obvyklých stejnosměrných 3000 V.

Italská trať nám ukazuje počáteční hledání nejvhodnější soustavy pro napájení vlaků. Volba napájení byla limitována technickým pokrokem. Na začátku 20. století nebyly k dispozici polovodiče a elektronika, která by zajistila snadnou úpravu a regulaci proudu a napětí přímo v lokomotivě, jako je tomu u moderních strojů. Proto si museli konstruktéři vystačit s jednoduchým a tehdy dostupným řešením. Každá soustava napájení přitom nabízela určité výhody. Na jednotlivých tratích se proto objevily různé systémy: stejnosměrné nebo střídavé, s různým napětím a frekvencí nebo počtem vodičů a fází. Ferrovia della Valtellina využila třífázové napájení – dva trolejové vodiče vedle sebe a jako třetí vodič kolejnice. Rekordní vůz AEG z roku 1903 napájel také třífázový proud, ovšem ze tří nad sebou umístěných trolejí. K tomu byl vybaven vysokým a neobvyklým pantografem s bočními ližinami.

Nabídka trakcí byla na počátku elektrifikace velice pestrá, Bavorská Ammergaubahn využívala 5 500 V 16 2/3 Hz, švýcarská dráha Seebahn – Wettingen elektrifikovali systémem 15 000 V 50 Hz, rakouská úzkokolejka Mariazellerbahn používá od roku 1911 trakci 6 500 V 25 Hz a Rhétská železnice 11 000 V 16 2/3 Hz. Oblíbené byly i stejnoměrné systémy. Ovšem už mezi světovými válkami se vyprofilovaly tři nejrozšířenější napájecí trakční soustavy, které ovládaly Evropu. Ve Francii nebo v Nizozemí to bylo stejnosměrných 1 500 V. Itálie a Belgie začaly používat vyšší napětí 3000 V, které se prosadilo v roce 1945 i v dalších státech. V německy hovořících zemích a Skandinávii elektrifikovali střídavými 15 000 V 16 2/3 Hz, dnes 16,7 Hz. Teprve v 60. letech 20. století přibyl čtvrtý systém 25 000 V 50 Hz. Jeho využití umožnil vývoj moderních polovodičových prvků. Přesto dodnes na mnoha izolovaných úzkokolejných tratích zůstávají i jiné soustavy.

V Čechách byl velkým propagátorem elektřiny František Křižík. Její velké uplatnění viděl právě v dopravě, proto stál za mnoha projekty, které můžeme označit za první v Čechách. Vedle tramvajových provozů zkoušel už na konci 19. století na trati z Nuslí na Zbraslav elektrický vůz s akumulátorovými bateriemi. Na začátku 20. století dostal příležitost vybudovat první elektrickou dráhu v monarchii. Šance se ujal s plným nasazením a 21. června 1903 zahájil provoz na 23 kilometrů dlouhé dráze Tábor – Bechyně, na které demonstroval výhody elektrického pohonu. Trať

maximálně přizpůsobil krajíně, proto jsou na ní sklony až 41 promile, se kterými elektrické vozy neměly problém na rozdíl od parních.

Křižík byl zastáncem stejnosměrné proudové soustavy, proto ji zvolil na svou dráhu. Použil třívodičové vedení o napětí 2×700 V. Nad kolejemi byla zavěšena dvojice drátů a třetím byla kolejnice. Dopravu zajišťovaly čtyřnápravové elektrické vozy z Ringhofferovy vagonky v Praze s elektrickou výzbrojí Františka Křižíka. Teprve v roce 1938 prošla dráha i vozy modernizací na systém 1 500 V stejnosměrných.

Ještě za monarchie u nás vznikla další elektrická železnice z Rybníka přes vyšší Brod do Lipna nad Vltavou. Vlaky se na ní rozjely v roce 1911 a jejich dodavatelem byla taktéž vagonka Ringhoffer, tentokrát ale s elektrickou výzbrojí Siemens. Dráha využívala stejnosměrnou proudovou soustavu s napětím 1 200 V, které bylo v 50. letech zvýšeno na 1 500 V. V letech 1914 a 1923 k nám byla do pohraničí přivedena německá trakce 15 000 V 16 2/3 Hz.

Myšlenkou na elektrizaci tratí se začali zabývat také odborníci v Československu. Podnikli studijní cesty do zemí, které měly s elektrizací větší zkušenosti, jako dříve zmíněná Itálie, Švýcarsko nebo Francie a připravili první návrhy. V roce 1924 rozhodli o využívání stejnosměrné proudové soustavy 1 500 V. Měli pro to několik důvodů, například jednoduchost stejnosměrných pohonů a jejich regulace, dále také dobré zkušenosti z Francie. Byly zde i strategické důvody: orientace Československa na Francii a fakt, že systém 15 000 V 16 2/3 Hz používají Němci. V případě konfliktu by proto nemohli použít své elektrické lokomotivy.

Začátky elektřiny v železniční dopravě nebyly jednoduché, velmi rychle ale ukázala, že k jejím parametrům se nedokáže žádná jiná trakce ani přiblížit. Proto se po druhé světové válce většina železnic soustředila na elektrizaci svých tratí, Československo nevyjímaje. I přesto máme oproti ostatním zemím zavádějící elektrifikaci zpoždění a proto je možná ideální příležitostí k předsevzetí dalšího rozmachu elektřiny na české železnici.

2 VÝPOČET MĚRNÉ ENERGIE PRO TRAKCI

Podle ČSN 01 1300 jsou u nás zavedeny měrové jednotky SI dle zákona č. 35/62 Sb. Měrové jednotky podle této soustavy potřebné pro energetické výpočty.

- Hmotnost	M	[t]
- Tíha	G	[kN], $G=9,81 M$ [kN;t]
- Rychlost	v	[km/h]
- Dopravní práce	W_d	[tkm]
- Vzdálenost	L	[km]

Dopravní práce vyjádřena v tkm není fyzikální pojem, ale ekonomický. Vyjadřuje, že hmotnost M se přemísťuje na vzdálenost L .

Měrná elektrická energie při jízdě vlaku se skládá z těchto složek, připadající na 1 tkm dopravní práce :

a) Z užitečné trakční práce potřebné k překonání mechanických trakčních odporů ujeté dráhy a to:

- Trakční práce tažné síly po vodorovné trati

$$A_o = 9,81 * 10^3 * p_o \text{ [Nm * t}^{-1} * \text{km}^{-1}; N * \text{kN}^{-1}] \quad (2.1)$$

- Zdvihové práce do stoupání

$$A_o = 9,81 * 10^3 * p_s \text{ [Nm * t}^{-1} * \text{km}^{-1}; N * \text{kN}^{-1}] \quad (2.2)$$

- Přídavné práce

$$A_o = 9,81 * 10^3 * p_r \text{ [Nm * t}^{-1} * \text{km}^{-1}; N * \text{kN}^{-1}] \quad (2.3)$$

Trakční práce můžeme nahradit pojmem odporové výšky, což je náhradní výškový rozdíl h [m], vyžadující stejnou zdvihovou práci, jako potřebuje jízda trakční práci.

Pro jízdu na vodorovné trati je odporová výška

$$h_o = L_o * p_o \text{ [m; km; N * km}^{-1}] \quad (2.4)$$

Pro jízdu do stoupání je odporová výška dána přímo výškovým rozdílem

$$h_s = L_s * p_s \text{ [m; km; N * km}^{-1}] \quad (2.5)$$

Odporová výška oblouku je

$$h_r = L_r * p_r \text{ [m; km; N * km}^{-1}] \quad (2.6)$$

kde značí:

p_o – jízdní odpor vlaku	[N*kN ⁻¹] nebo [‰]
L_o – délka dráhy projížděná silou	[km]
p_s – odpor sklonu (stoupání)	[N*km ⁻¹] nebo [‰]
L_s – délka skloněné dráhy	[km]
p_r – přidavný odpor oblouku	[N*km ⁻¹] nebo [‰]
L_r – délka oblouku	[km]

Trakční práci vynaloženou k jízdě mezi dvěma místy vzdálenými L km, připadající na 1 t hmotnosti vlaku určíme jako součet dílčích prací potřebných k překonání odporových výšek

$$A = \left(\sum_o^L L_o * p_o + \sum_o^L L_s * p_s * s + \sum_o^L L_r * p_r \right) * 9,81 * 10^3 [Nm * t^{-1}; km; N * km^{-1}] \quad (2.7)$$

a dosazením odporových výšek obdržíme

$$A = \left(\sum_o^L h_o + \sum_o^L h_s + \sum_o^L h_r \right) * 9,81 * 10^3 [Nm * t^{-1}; m] \quad (2.8)$$

Měrnou spotřebu energie w [Wh/tkm] trakčního vozidla a napájecí soustavy, kde účinnost je η , dostaneme dělením užitečné trakční práce A, elektromechanickým ekvivalentem [3600 Mn=1Wh] a délkou jízdy L, účinností vozidla a napájecí soustavy η . Tímto zjistíme spotřebu v napájecí stanici pro jízdu rovnoměrnou rychlostí.

$$W = \frac{A}{3600 * L * \eta} [Wh * t^{-1} * km^{-1}; Nm * t^{-1}; km], \quad \eta < 1 \quad (2.9)$$

a dosazením odporových výšek

$$W = \frac{\sum_o^L h_o + \sum_o^L h_s + \sum_o^L h_r}{3600 * L * \eta} * 9,81 * 10^3 \quad (2.10)$$

$$W = \frac{2,78 \sum_o^L h}{L * \eta} \quad (2.11)$$

kde $\sum_o^L h$ je součtová odporová výška celé jízdy po dráze L

$$\sum_o^L h = \sum_o^L h_o + \sum_o^L h_s + \sum_o^L h_r \quad (2.12)$$

Na vodorovné přímé trati je měrná spotřeba

$$W_o = \frac{2,72}{\eta * L} * \sum_o^L h_o = \frac{2,72}{\eta} * \frac{\sum_o^L h_o}{L} = \frac{2,72}{\eta} * p_o \quad (2.13)$$

Na trati se stoupáním s [‰] bude pak přídavná měrná spotřeba (při $p_s=s$)

$$W_s = \frac{2,72}{\eta} * s \left[\frac{Wh}{tkm}; \text{‰} \right] \quad (2.14)$$

kde s je střední sklon v uvažované délce trati, a započítávají se všechny úseky projížděné silou.

b) Ztráty rozjezdem a brzděním jsou způsobeny menší účinností energetických přeměn na trakčních vozidlech při spouštění, tedy při rozjezdu z klidu, než při jízdě plným výkonem nebo napětím, jakož i ztrátami třením v brzdách během zábrzdného pochodu, kdy se mění větší část pohybové energie hmoty vlaku v neúčinné teplo brzděním. Pohybová energie mařená brzděním je získávána při rozjezdech sníženou účinností a proto lze obě ztrátové složky, tedy ztráty spouštěcí při rozjezdu a ztráty brzděním sledovat společně. Vypočtou se nejdříve ztráty brzděním a tyto ztráty se pak zvětšují v poměru účinnosti při jízdě a při spouštění. Přesně platí tato úvaha jen v případě, že jsou rozjezdové a brzdové rychlosti stejné, že se odehrávají oba pochody na vodorovných traťových úsecích a že celá pohybová energie se brzděním mění v neúčinné teplo.

Pohybová energie 1 t hmoty vlaku je při brzdové rychlosti v_b

$$A_e = 38,58 * \xi * v_b^2 \quad [NM * t^{-1}; km * h^{-1}] \quad (2.15)$$

kde ξ je součinitel rotujících hmot, jehož velikost je u

- Elektrických lokomotiv 1,2 až 1,25
- Nákladních vozů naložených 1,05
- Nákladních vozů prázdných 1,1
- Ostatních vozů 1,06

Tato pohybová energie byla při rozjezdu získána se sníženou účinností η_r , takže byla vynaložena energie

$$\varepsilon = \frac{\eta_L}{\eta_r} > 1 \quad (2.16)$$

a převedeme i urychlovací práci na účinnosti $\eta = \eta_L * \eta_T$, tedy na součin účinností lokomotivy a rozvodu trakčního proudu:

$$A_{el} = \frac{\varepsilon}{\eta_L * \eta_T} * 38,58 * \xi * v_b^2 \quad (2.17)$$

což vyjádříme ve Wh/h:

$$A_{el} = \frac{\varepsilon}{\eta} * \frac{38,58}{3600} * \xi * v_b^2 \quad (2.18)$$

$$A_{el} = 1,072 * \xi * \frac{\varepsilon}{\eta} * v_b^2 * 10^{-2} \quad [Wh * t^{-1}; km * h^{-1}] \quad (2.19)$$

d) Spotřeba pomocných zařízení a pomocných pohonů na trakčním vozidle a ve vlaku není zanedbatelnou položkou. Je způsobena pohonem kompresorů, ventilátorů, čerpadel i elektrickým vytápěním. Tyto podpůrné funkce označíme jako A_k a vyjádříme pomocí součinitele $k\%$ prvotního jmenovitého výkonu trakčního vozidla $P_1 [kW]$ a předpokládáme, že trvá po celou dobu jízdy $T [h]$, tedy

$$A_k = \frac{k}{100} * \frac{P_1 * T}{M} * 1000 \quad [Wh * t^{-1}; \% ; kW ; h ; t] \quad (2.20)$$

kde M je hmotnost vlaku [t].

Hodnota součinitele k se pohybuje u elektrických lokomotiv stejnosměrných v mezích od 2 až 3 %. Při elektrickém vytápění osobních vlaků je přípojná hodnota topných těles řádově 0,5 kW/t přípojných vozů. Měrná spotřeba elektrické energie se tedy skládá z užitečné trakční práce a neužitečných ztrátových složek, které lze vyjádřit rovnicí

$$W = \frac{2,72}{L} \left(\sum_o^L h_o + \sum_o^L h_s + \sum_o^L h_r + \varepsilon * \sum_1^n h_e + 10k * \frac{P_1 * T}{M} * \frac{\eta_L}{2,72} \right) * \frac{1}{\eta_L} \quad (2.21)$$

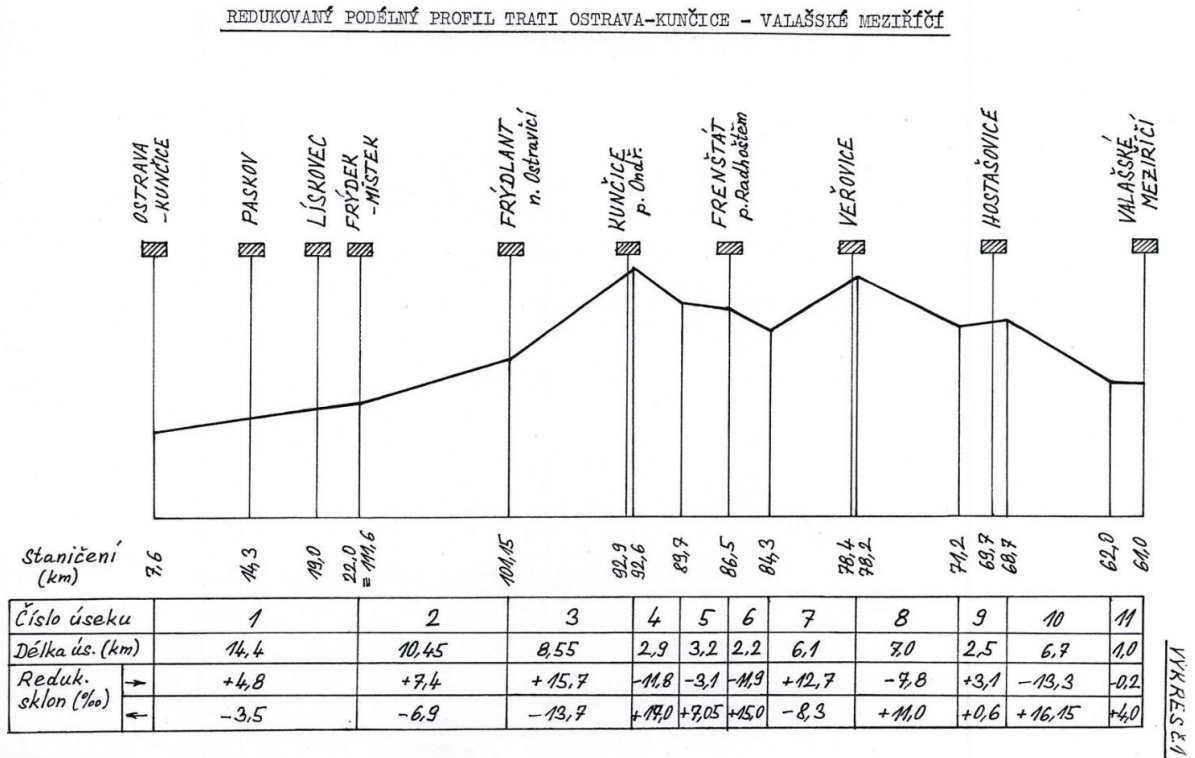
kde n je počet rozjezdů a zastavení.

Při výpočtu měrné spotřeby metodou ztrátových složek se postupuje takto:

1. K výpočtu potřebujeme znát:
 - složení vlaku, tedy hmotnost a druh lokomotivy a vozů,
 - výškový a vodorovný profil trati,
 - rychlost jízdy podle grafikonu,

- počet nebo vzdálenost zastávek,
- dobu jízdy včetně pobytu ve stanicích.

Výchozím podkladem pro energetické výpočty je podélný profil trati, který obsahuje údaje o traťových obloucích, poloměry i délky oblouků. Úpravou i zjednodušením skutečného profilu získáme náhradní profil trati s delšími úseky stálých sklonů. Provádí se pomocí nadmořských výšek důležitých bodů, tedy důležitých stanic a míst, kde nastává změna sklonů, tedy stoupání se mění na spád a naopak, viz obr.1.



Obrázek 1 – Redukovaný podélný profil trati

Náhradní stálý sklon se určí rovnicí

$$S_s = \frac{h}{L} = p_{ss} \quad [‰; m; km; N * km^{-1}] \quad (2.22)$$

Také můžeme určit střední odpor oblouku v daném úseku pomocí rovnice

$$p_{rs} = \frac{\sum p_r * L_r}{L} \quad [N * kN^{-1}; N * kN^{-1}; km] \quad (2.23)$$

Střední odpor oblouků p_{rs} se však obvykle nepočítá a volí se v mezích 0,5 až 1,0. Sloučením obou těchto pojmů S_s a p_{rs} docházíme k novému pojmu, tzv. redukovanému sklonu $S_{red} = p_{rs} \pm S_s$, který je pro každý směr jízdy jiný.

2. Určí se traťové úseky projížděné silou pro oba směry jízdy,
3. Určí se odporové výšky všech úseků projížděných silou,
4. Určí se měrné ztráty rozjezdem a brzděním,

5. Vypočte se měrná spotřeba energie v napájecí stanici volbou vhodné střední účinnosti lokomotivy a rozvodu trakčního proudu.

Takto stanovené měrné spotřeby jsou nejmenší, jaké možno dosáhnout pravidelnou jízdou a hospodárnou jízdou technikou. Ve skutečnosti mohou být měrné spotřeby vyšší vlivem nepravidelností, např. pomalými jízdami, zastavováním před návěstidly, prodlouženou nebo zkrácenou jízdou, zvětšenými jízdami odpory (např. v zimě), většími ztrátami v rozvodu trakčního proudu přetížením sítě atd. Dávají se proto na teoreticky vypočtené hodnoty přírážky 5 až 10 %, podle povahy provozu. Pro běžné výpočty energetické a pro výpočty dopravní výkonnosti energetických zařízení je dobré volit typové vlaky, které svým složením, jízdou rychlostí a vzdáleností stanic odpovídají váženému průměru běžných druhů vlaků. Takovými typovými vlaky mohou být např.:

1. Těžké dálkové nákladní vlaky /Pn/, jezdící rychlostí 55 až 65 km/h, se vzdáleností stanic 25 až 50 km, hmotnost vlaku ~ 1500 t.

2. Rychlé nákladní vlaky /Rn/, jezdící rychlostí 60 až 90 km/h, se vzdáleností stanic 25 až 50 km. Hmotnost vlaku ~ 1500 t.

3. Osobní vlaky /Os/, jezdící střední rychlostí 40 km/h při vzdálenosti stanic 4 až 5 km. Hmotnost vlaku ~ 400 t.

4. Rychlíky /R/, jezdící rychlostí 100 km/h při vzdálenosti stanic 30 až 50 i více km. Hmotnost vlaku ~ 600 t.

5. Místní nebo předměstské motorové vlaky, jezdící maximální rychlostí 80 až 100 km/h, střední rychlostí 60 km/h při vzdálenosti stanic 3 až 5 km. Hmotnost vlaku ~ 250 t.

Pro volené typové vlaky provedeme výpočet měrných spotřeb nejdříve pro přímou vodorovnou trať a výsledné hodnoty sestavíme do číselné tabulky.

3 TRAKČNÍ PROUDOVÉ SOUSTAVY

Volba proudové soustavy pro elektrizaci železnic má svůj historický vývoj. Odmyslíme-li si první začátky elektrického provozu na vedlejších tratích ještě před první světovou válkou, jako trati Tábor - Bechyně stejnosměrným proudem 2 x 700 V (třívodič) z roku 1903, Rybník - Lipno napětím 1200 V v roce 1911, které neřešily soustavnou elektrizaci, můžeme spatřovat začátky elektrizace železnic v rozhodnutí z r. 1924 o elektrizaci pražských nádraží stejnosměrným proudem 1500 V se zaměřením na elektrizaci předměstské dopravy. K dalšímu provádění projektů elektrizace předměstské dopravy nedošlo a elektrický provoz napětím 1500 V na hlavním nádraží sloužil jako torso celých 30 let, než byl převeden na 3 kV v rámci soustavné elektrizace. Za druhé světové války se rozhodly Slovenské železnice elektrizovat hlavní trať Košice - Žilina - Bratislava jednofázovým proudem 15 kV 16 2/3 Hz, daly vypracovat německým firmám podrobné elektrizační projekty, objednaly materiál pro trolejové vedení, kabelizaci sdělovacích a zabezpečovacích spojů a lokomotivy. Vývoj válečných událostí a osvobození ČSSR způsobily, že k realizaci těchto projektů nedošlo.

Soustavná elektrizace hlavních tratí byla jednoznačně uznána jako nejvýhodnější způsob řešící všestranně tuto úlohu. Jako trakční proudový systém byl volen po úvahách systém stejnosměrný 3 kV napájený přes usměrňovače a transformátory z trojfázové energetické sítě. Pro tuto volbu byly v té době rozhodující tyto důvody:

1. Jde o elektrizaci provozu na tratích dopravně nejvíce zatížených v poměrně krátké době asi pěti let, bez možnosti provádět zkoušky s různými proudovými systémy.
2. Nutno volit nejlépe osvědčený vyzkoušený systém, jaký volily železniční správy s podobným charakterem dopravy v poslední době.
3. Sovětský Svaz, Polsko, Belgie volily po druhé světové válce, tudíž ve stejné době, opět stejnosměrný proudový systém 3 kV.
4. Bylo nutno volit systém, který umožňuje napájení z trojfázové energetické sítě, aby přídatné investiční náklady na výstavbu energetických výroben a rozvodů VVN byly co nejmenší.
5. Přejít na systém 1500 V zavedený na pražských nádražích.

Všem těmto hlediskům nejlépe vyhovoval proudový systém stejnosměrný 3 kV. O jednofázovém systému sníženého kmitočtu 15 kV 16 2/3 Hz nebylo uvažováno a to hlavně pro velké náklady na výstavbu samostatného jednofázového energetického výrobního a rozvodného systému anebo složitost a neekonomičnost přeměny trojfázového proudu 50 Hz na proud jednofázový 16 2/3 Hz. Naproti tomu se však uvažovalo o jednofázovém proudovém systému průmyslového kmitočtu. Jednofázový proudový systém průmyslového kmitočtu byl dále sledován jako výzkumný a vývojový úkol elektrotechnického průmyslu. Mezi tím probíhala jednání s energetikou o způsobu napájení trakčních měníren z rozvodu VVN 110 kV. Jak technické a hospodářské propočty ukázaly, je napájení měníren z transformovny 110/22 kV, tudíž s mezinapětím 22 kV výhodnější a provozně spolehlivější než napájení přímé 110/3 kV a to hlavně z těchto důvodů:

1. Transformace 110/22 kV se provádí ve větších, provozně spolehlivějších jednotkách 10 až 16 MVA s možností regulace napětí na straně VVN.
2. V rozvodnách a transformovnách 110/22 kV může kterýkoliv transformátor 110/22 kV sloužit jako záloha pro napájení měnírny.

3. Transformátory 22/3 kV jsou provozně spolehlivější, dávají menší zkratové proudy na straně stejnosměrné a jsou chráněny před poruchami od atmosférických přepětí z venkovního rozvodu VVN.

4. Volbou mezinapětí 22 kV se usnadňuje řešení zdroje pomocného proudu v měničce i transformace na napětí 6 kV.

5. Při napájení měničny z rozvodny a transformovny 110/22 kV, které je velmi časté, odpadá jednak vlastní rozvodna a transformovna a rozvodna VN (22 kV) v měničce je podstatně jednodušší a levnější než při 110 kV.

Tato stejnosměrná proudová soustava byla jednotně použita v celé výstavbě elektrizovaných tratí až do roku 1965 a bude i dále použita při elektrizaci některých přilehlých a doplňkových úseků hlavní elektrizované tepny, jejíž elektrizace byla dokončena.

Pokroky ve stavbě a provozu jednofázových lokomotiv 50 Hz, zejména s použitím polovodičových usměrňovačů v cizině (Francie, SSSR, Německo, Anglie, Japonsko) na straně jedné a obtíže vznikající na horských úsecích s dopravou velmi těžkých vlaků (2000 až 2500 t) při napájení stejnosměrným proudem způsobily, že se ministerstvo dopravy podporované Československým průmyslem roce v 1958 rozhodlo vyzkoušet v plném měřítku elektrické trakční zařízení jednofázové 25 kV, 50 Hz a vybavili za tím účelem jeden traťový úsek transformovnou a trakčním vedením na němž zkoušeli první jednofázové lokomotivy československé výroby s ignitronovými a s polovodičovými křemíkovými usměrňovači. Dobré výsledky těchto zkoušek a technické i ekonomické propočty přivedly železniční správu v roce 1960 k rozhodnutí přijmout pro elektrizaci dalších souvisejících tratí jednofázovou proudovou soustavu 50 Hz jako druhou trakční proudovou soustavu pro elektrizaci železnic. Pro toto tak závažné rozhodnutí byla směřovatná tato hlediska:

1. Jednofázová proudová soustava 25 kV, 50 Hz umožňuje podstatné zmenšení potřeby materiálu na výstavbu napájecích stanic a trakčního vedení, zejména v kovech pro vodiče.

2. Zmenšují se investiční a provozní náklady na pevná trakční zařízení.

3. Zlepší se regulační a trakční vlastnosti elektrických lokomotiv a umožní se tím zmenšení vlastních vah a zvětšení hmotného výkonu.

4. V důsledku toho se umožní podstatné zrychlení další elektrizace.

5. Odpadá prakticky úbytek napětí v trakční síti jako omezující činitel pro váhu a interval vlaků.

Po stránce ekonomické byly založeny porovnávací studie na předpokladu, že se československému průmyslu podaří vyřešit spolehlivé a výkonné jednofázové lokomotivy v cenové hladině porovnatelné se stejnosměrnými lokomotivami sériově vyráběnými, kde dosáhl průmysl pozoruhodných úspěšných výsledků. Volbou druhé proudové soustavy vzniknou v dalších letech dvě kolejové tepny v železniční síti probíhající podélně státním územím a to jedna severní se stejnosměrnou proudovou soustavou a druhá jihozápadní s jednofázovou soustavou. V příčných spojkách vznikne přechod mezi proudovými soustavami, který ve styčných místech nepříznivě projeví pro obě proudové soustavy, ať je řešen styk a přechod jakýmkoliv způsobem, pokud potrvá koexistence dvou proudových soustav. Z těchto důvodů rozhodlo ministerstvo, že se bude výhledově sledovat přechod na jednotný proudový systém 25 kV, 50 Hz v celé síti racionálním způsobem a z tohoto hlediska mají být stavěna všechna další trakční zařízení.

4 STEJNOSMĚRNÁ PROUDOVÁ SOUSTAVA

Energetické napájení elektrických drah stejnosměrné proudové soustavy 3 kV se děje vesměs ze 3-fázové sítě, 50 Hz, velmi vysokého napětí, která spojuje výroby, centrály, elektrárny s napájecími a rozvodnými uzly a s velkými spotřebiteli, mezi které se počítají elektrické železnice. V současné době jsou v hospodářsky vyvinutých zemích, kde již jsou nebo i budou elektrizovány železnice, elektroenergetické systémy s rozvodnými sítěmi VVN tak husté a přenášejí tak velké výkony, že přídatné zatížení dráhovým odběrem nevyžaduje obvykle ani jejich zesílení v centrálách, ani v rozvodné síti, protože dráhový odběr bývá jen malým procentem spotřeby elektrické energie v zemi. Elektrickou energii je však nutno přivést ke dráze do napájecích míst, kde se trojfázový proud usměrňuje v měničnách na trakční proud jmenovitého napětí 3 kV. Dráhový odběr je z hlediska nerovnoměrnosti odběru a požadavku na nepřerušenu trvalou a pohotovou dodávku energie náročný. Nevadí mu sice krátkodobé přerušování dodávky energie trvající méně než 2 minuty, ale s ohledem na plynulou dopravu jsou zcela nepřijatelné déle trvající, třeba i předem hlášené proudové výluky např. pro nutné revize, opravy, přestavby apod. Dále je odběr energie v jednotlivých napájecích místech velmi kolísavý, často v poměru 1 : 6 i více, kde za základ je vzat střední celodenní odběr. Napájecí soustava musí být proto trvale připravena ke krytí těchto výkonových špiček, které se však neobjevují současně v celé železniční síti. Naopak čím rozlehlejší je napájená železniční síť, tím rovnoměrnější je její celkový odběr.

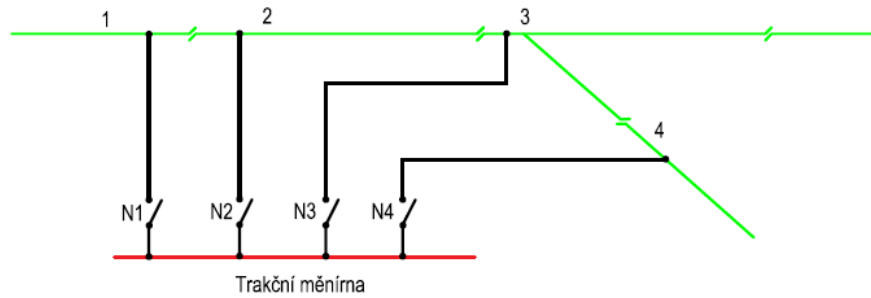
Energetická napájecí soustava musí být proto propojena tak, aby napájela co největší počet trakčních měníren a tak se v ní vyrovnaly místní výkonové špičky. Dále musí být řešena tak, aby jednoduchou výlukou nebo poruchou nebyla přerušena do trakčních měníren dodávka elektrické energie.

4.1 Napájení elektrických drah stejnosměrné proudové soustavy

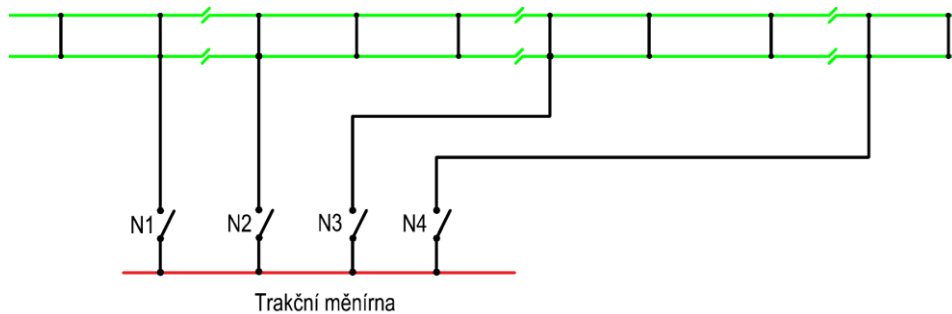
Trakční síť je napájena trakčním proudem z měníren. Za účelem lokalizace poruch a k omezení velikosti napájecích proudů se dělí trakční síť na úseky, které se odděleně napájí. Podle způsobu dělení a napájení jednotlivých úseků trakční síť rozlišujeme tyto druhy:

a) Jednostranné, soustředěné napájení

Větší počet úseků trakčního vedení je jednotlivě a jednostranně napájen ze společné stanice (Obrázek 2), kde každý úsek má svůj vlastní napáječ. Tohoto způsobu se používá v rozlehlých kolejištích uzlových stanic a v městské dopravě vůbec, kde se obvykle připojuje trolejové vedení dvoukolejně tratě v úseku ke společnému napáječovi (Obrázek 3). K lepšímu využití vodivého průřezu vedení se vkládaly příčné spojky mezi vedeními obou kolejí. Výhodou tohoto způsobu napájení je jednoduchá a naprosto spolehlivá lokalizace poruch, přehlednost proudových cest a dobré využití vodivého průřezu zejména v úsecích s větším sklonem. Nevýhodou jsou poměrně krátké délky úseků vlivem jednostranného napájení a někdy i dlouhé napájecí kabely.



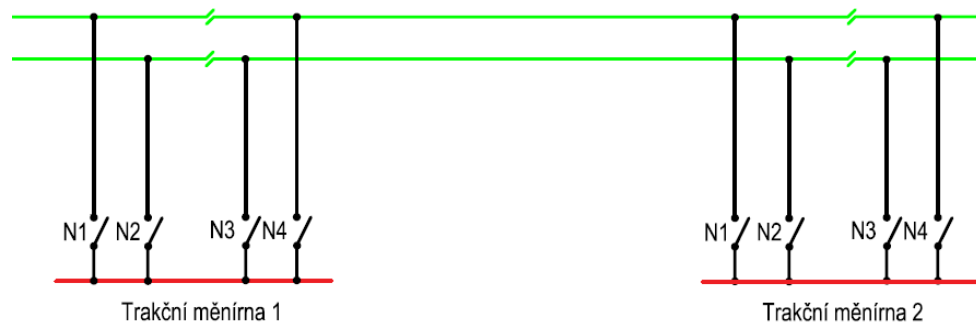
Obrázek 2 – Jednostranné napájení jednokolejné trati



Obrázek 3- Jednostranné napájení dvoukolejné trati

b) Dvoustranné rozložené napájení

Jednotlivé úseky jsou napájeny u obou konců z přilehlých napájecích stanic, čímž je možno prodloužit délku úseku s ohledem na úbytek napětí a proud napáječe na dvojnásobek při stejném vodivém průřezu a stejném měrném zatížení dopravním tokem. Na dvojkolejných železničních tratích se odděleně napájí trolejové vedení pravé a levé koleje, aby byl možný výlukový provoz na jedné koleji a zlepšena lokalizace poruch, tudíž aby byl provoz na obou kolejích energeticky nezávislý. Poloha napájecí stanice je nejvhodnější v místě úsekového dělení, takže lze napájet trolejové vedení na obě strany nejkratším napájecím vedením (Obrázek 4).



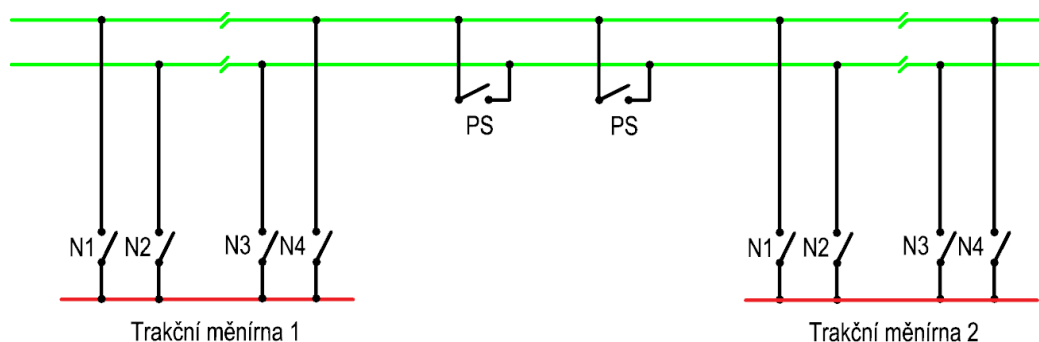
Obrázek 4 – Dvoustranné rozložené napájení dvoukolejné trati

Na dvoukolejných tratích vycházejí z napájecích stanic obvykle 4 napáječe, které zaústí ují ve stanici do společné přípojnice 3 kV. Tato přípojnice propojuje elektricky při zapnutých napájecích podélně a při přičně všechny připojené 4 trolejové úseky. Není-li měřna v chodu, ale napáječe jsou připojeny, tvoří přípojnice v rozvodně 3 kV příčné a podélné spojení mezi všemi připojenými

úseky. K lokalizaci poruch při zkratech nebo přetíženích na kterémkoliv místě rozvodu trakčního proudu je třeba odepnout poruchový úsek z obou stran, čehož se dosáhne polarizací nebo proudovým směřováním citlivosti napáječových vypínačů ve stanicích. Usměrňovací soustrojí se rtuťovými usměrňovači musí být na stejnosměrné straně chráněny zpětnými rychlovypínači před účinky zpětného zkratu. Tyto vypínače jsou pak necitlivé na zkraty v trakční síti, které musí vypínat napáječové vypínače zkratem postiženého úseku. U usměrňovacích soustrojí s křemíkovými usměrňovači se nepočítá se zpětnými zkraty, protože jsou nepravděpodobné vzhledem na poměrně veliký počet za sebou spojených diod a proto se zde nepoužívá strojových rychlovypínačů. K zajištění bezpečného vypínání poruchového úseku z obou stran, což je ostatně nutné i při provozním odpínání úseku, se zavádí elektrická vazba napáječů, která působí tak, že vypínač, který je blíže místu poruchy nebo vypíná jako první rozpojuje elektrický obvod přídržného proudu vypínače z druhé strany úseku.

c) Čtyřstranné napájení dvoukolejně tratě s příčnými spínači

Je to způsob napájení, který využívá vodivého průřezu trolejových a případně i zesilovacích vedení obou kolejí na širé trati, což je zejména účelné na úsecích s většími sklony. Tam má vedení po spádu nepatrné zatížení (při rekuperaci dokonce negativní zatížení), musí být však kvůli výlukové jízdě po nesprávné koleji vodivě stejně dimenzované jako nad kolejí ve směru do stoupání. Je účelné provádět příčné spojení na více úsecích. Při proudových poruchách a k provoznímu rozpojení trolejových vedení obou směrů jsou příčné spínače napěťově závislé, tedy vypínají, je-li trolejové vedení bez napětí a samočinně se zapínají v případě, že vedení obou směrů mají plné napětí. Vlivem příčných spínačů musí při proudových poruchách přirozeně vypínat vždy čtyři napáječe, následují pak příčné odpínače, které vypínají v bezproudém stavu. Po opětovném zapnutí všech napáječových vypínačů obou kolejí se připínají samočinně příčné spínače, jakmile se objeví plné napětí z obou stran. Má-li trolejové vedení jen jeden směr jízdního napětí, příčné spínače nezapínají.

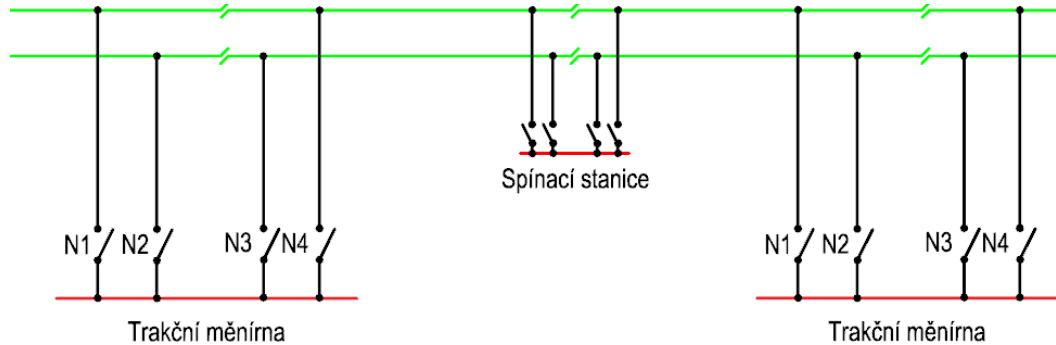


Obrázek 5 – Dvoustranné napájení dvoukolejně tratě s příčnými spínači

d) Čtyřstranné napájení dvoukolejně tratě se spínací stanicí

Podélným elektrickým rozdělením dvoustranně napájeného dvoukolejněho úseku uprostřed a přemostěním dělicích míst čtyřmi směrovými vypínači v provedení obdobném, jako v rozvodně napáječů v napájecí stanici vznikne čtyřstranné napájení se spínací stanicí. Touto spínací stanicí se získá příčné propojení trolejových vedení obou jízdních směrů a podélné rozdělení úseků k užší lokalizaci poruch. Při proudové poruše v některém místě se totiž vypíná jen poloviční délka

jednoho úseku. Směrované ochranné vypínače ve spínací stanici mohou mít elektrickou vazbu s vypínači v přilehlé napájecí stanici, čímž se zvýší bezpečnost vypínání dílčího úseku z obou stran.



Obrázek 6 - Dvoustranné napájení dvoukolejn trati se spínací stanicí

4.2 Výpočet úbytku napětí stejnosmřné proudov soustavy

Součástmi trakční napájecí soustavy jsou jak trakční měnřny tak i trakční vedení, proto je nutné soustavu řešit komplexně, protože se vzdáleností měnřen souvisí jak jejich výkon, tak průřez trakčního vedení. Dan úkol se dá technicky řešit mnohými způsoby a z nich je pak nutné vybrat variantu, která vyhovuje nejen technicky, ale i z hlediska investičních a provozních nákladů.

V předpisech ČSN 34 1500, čl. 11 je uvedena tabulka jmenovitých napětí stejnosmřných trakčních soustav (aritmetické střední hodnoty usmřněného napětí) a dovolených mezí:

Tabulka 1- Jmenovité napětí stejnosmřných trakčních soustav

Jmenovité napětí dráhy	Napětí měnřny	Napětí trakčního vedení	
		Nejvyšší	Nejnižší
V	V	V	V
3000	3300	3600	2000
1500	1650	1800	1000
750	825	900	500
600	660	720	400
250	275	300	167

Jmenovité napětí měnřny U bude na připojnicích měnřny př jmenovitm zatížením o 10% vyšší ($1,1U$) a napětí př chodu na prázdno nesmí být více než o 20% vyšší ($1,2U$). V nejnepřiznivějším přpadě zatížení nesmí napětí v ktermkoliv místě klesnout na hodnotu nižší než $\frac{2}{3} U$. Podle tohoto ustanovení bude maximálně dovolen úbytek napětí v trakční síti dán vztahem

$$\Delta U_{dov} = (1,1 - 0,667) * U = 0,433 * U [V] \quad (4.1)$$

Tedy vyjádřeno v procentech napětí na přípojnicích měřirny při jmenovitém zatížení

$$\frac{(1,1 - 0,667) * U}{1,1 * U} * 100 \cong 39 [\%] \quad (4.2)$$

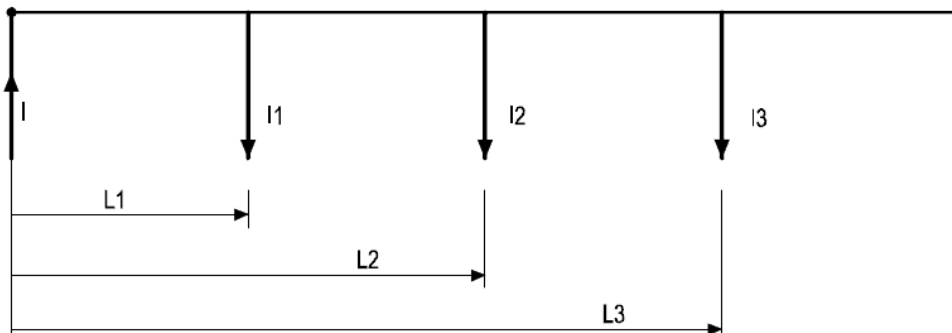
Vzhledem k možnému kolísání napětí primární sítě v mezích $\pm 5\%$ a na přípustnou hodnotu minimálního napětí trakční sítě se doporučuje v některých případech počítat s dovoleným úbytkem napětí

$$\Delta U_{dov} = (1,05 - 0,667) * U = 0,383 * U [V] \quad (4.3)$$

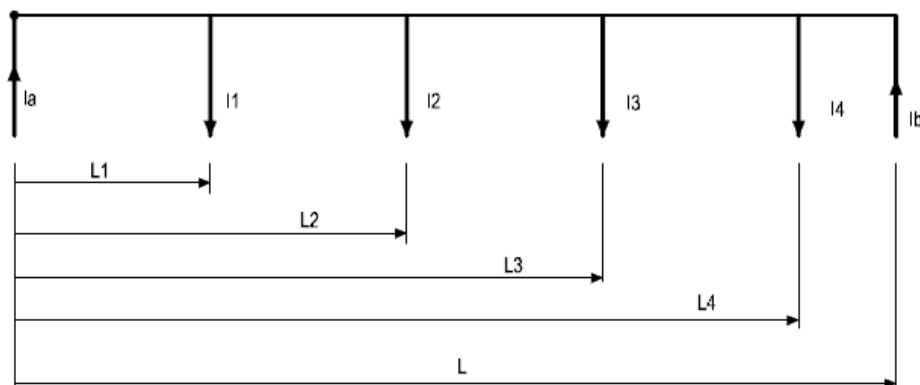
a vyjádřeno v procentech napětí na přípojnicích měřirny, v tomto případě $1,045 U$

$$\frac{(1,05 - 0,667) * U}{1,05 * U} * 100 = 36,5 [\%] \quad (4.4)$$

Uvažujme obecné rozložení proudových odběrů na daném traťovém úseku. Tento úsek může být napájen jednostranně (obr.7) nebo oboustranně (obr. 8). Při oboustranném napájení uvažujeme, že napětí na obou koncích v místech A i B bude stejné.



Obrázek 7- Jednostranné rozložení proudových odběrů



Obrázek 8 – Dvoustranné rozložení proudových odběrů

Při výpočtu proudu v napájeci I a úbytku napětí ΔU u jednostranně napájeného úseku použijeme vztahy

$$I = \sum_1^n I_k \quad \Delta U = R_o \sum_1^n L_k I_k \quad (4.5)$$

kde R_o je odpor 1 km přívodního i zpětného vedení trakčního proudu.

Při oboustranně napájeném úseku musíme napřed rozdělit celkové zatížení $\sum_1^n I_k$ na oba napáječe A i B. Například z rovnice

$$\sum_1^n L_k I_k = L * I_b \quad (4.6)$$

určíme I_b a pak I_a z další rovnice

$$I_a = \sum_1^n I_k - I_b \quad (4.7)$$

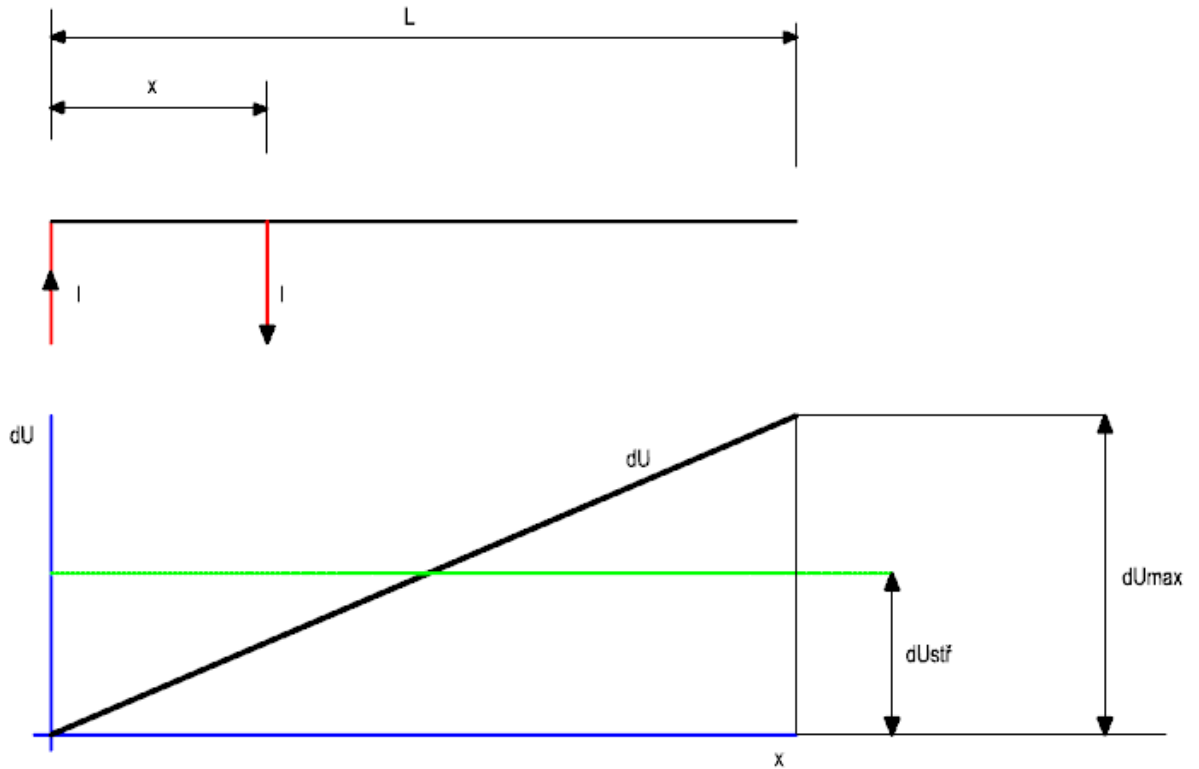
Dále pak postupujeme obdobně jako v případě jednostranného napájení podle rovnice pro úbytek napětí. Největší úbytek napětí bude v bodě, kde nastane změna směru napájecích proudů, tedy tam kde končí napájení z bodu A a kde převezme dodávku proudu napáječ B.

Nyní se budeme zabývat výpočtem úbytku napětí u různých případech napájení, kde

- určíme rovnici průběhu úbytku napětí v závislosti na vzdálenosti od napájecího bodu $\Delta U = f(x)$,
- stanovíme místo a velikost největšího úbytku napětí, který nesmí být větší než dovolený úbytek napětí $\Delta U_{max} \leq \Delta U_{dov}$. Postupujeme tedy tak, že určíme derivaci funkce ΔU a položíme ji rovno nule, tedy $f'(x)=0$ a z této rovnice určíme souřadnici x_m a její dosazení do rovnice $\Delta U = f(x)$ určíme ΔU_{max} . Tato hodnota je důležitá pro dimenzování trakčního vedení,
- zjistíme střední úbytek podle rovnice $\Delta U_{stř} = \frac{1}{L} \int_0^L \Delta U * dx$, tato hodnota má význam pro energetické výpočty.

Případy, kdy na trati je jediný vlak a jeho proudový odběr je roven proudu napáječe.

A1) Jednostranné napájení jednokolejné trati



Obrázek 9 – Jednostranné napájení jednokolejné trati

Průběh úbytku napětí podél trati je dán rovnicí

$$\Delta U = R_o * x * I \quad [V; \frac{ohm}{km}; km; A] \quad (4.8)$$

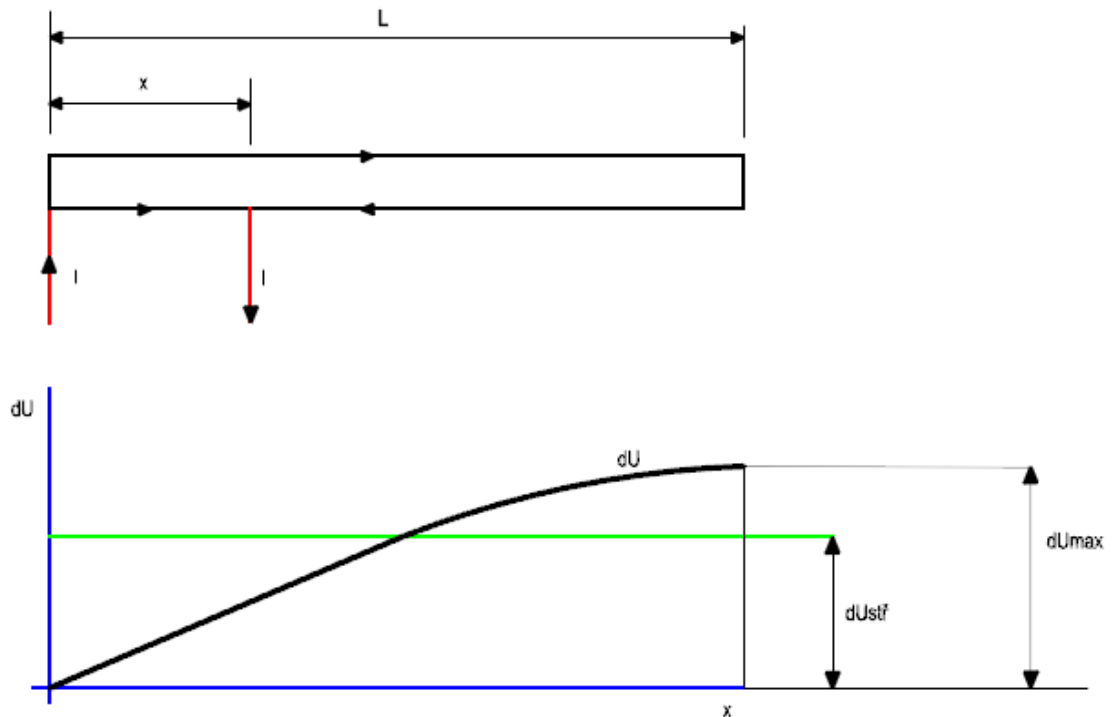
a největší hodnota úbytku napětí, která nesmí překročit hodnotu dovolenou bude při $x=L$ na konci vedení

$$\Delta U_{max} = R_o * L * I \quad [V; \frac{ohm}{km}; km; A; V] \quad (4.9)$$

Střední hodnota úbytku bude

$$\Delta U_{stř} = \frac{1}{2} \Delta U_{max} = \frac{1}{2} R_o * L * I \quad [V] \quad (4.10)$$

A2) Jednostranné napájení dvoukolejné trati s trolejovým vedením propojeným na konci



Obrázek 10 – Jednostranné napájení dvoukolejné trati s příčným propojením na konci

Uvažujeme případ, kde se nachází na celé trati jediný vlak odbírající proud. Trať je dvoukolejná, jednostranně napájená a na konci je trolejové vedení obou směrů propojené.

Celkový proud se rozdělí dle obrázku na dvě složky. V každém okamžiku platí

$$\Delta U = R_o * x * I_1 = R_o(2L - x) * I_2 \quad (4.11)$$

$$I = I_1 + I_2 \quad (4.12)$$

Z těchto rovnic určíme

$$\Delta U = R_o * I_x \frac{2L - x}{2L} \quad (4.13)$$

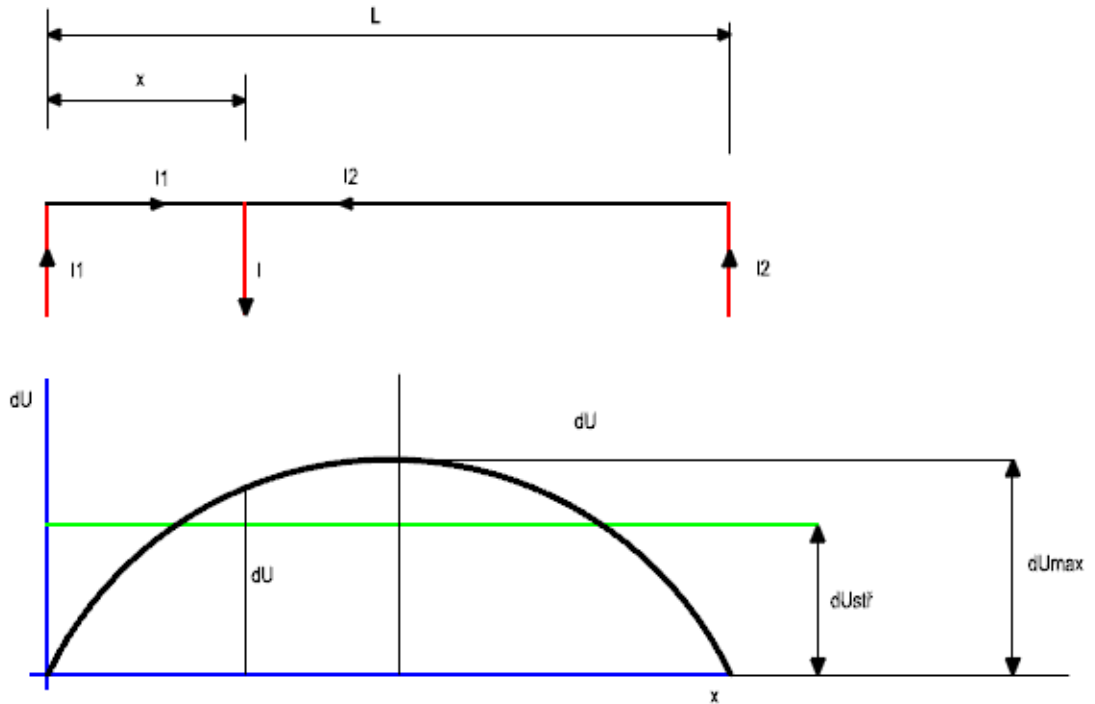
Průběh úbytků napětí je dán parabolou a maximální úbytek nastane pro $x_m = L$, kde bude

$$\Delta U_{max} = \frac{1}{2} R_o * I * L \leq \Delta U_{dov} \quad (4.14)$$

Střední úbytek napětí je dán rovnicí

$$\Delta U_{stř} = \frac{2}{3} U_{max} = \frac{1}{3} R_o * I * L \quad (4.15)$$

A3) Dvoustranné napájení jednokolejné trati



Obrázek 11 – Dvoustranné napájení jednokolejné trati

Pohybuje-li se zatížení podél trati, platí pro úbytek napětí obecně

$$\Delta U = R_o * x * I_1 = R_o(L - x) * I_2 \tag{4.16}$$

příčemž

$$I = I_1 + I_2 \tag{4.17}$$

Z těchto rovnic určíme výraz

$$\Delta U = R_o * I \frac{x(L - x)}{L} \tag{4.18}$$

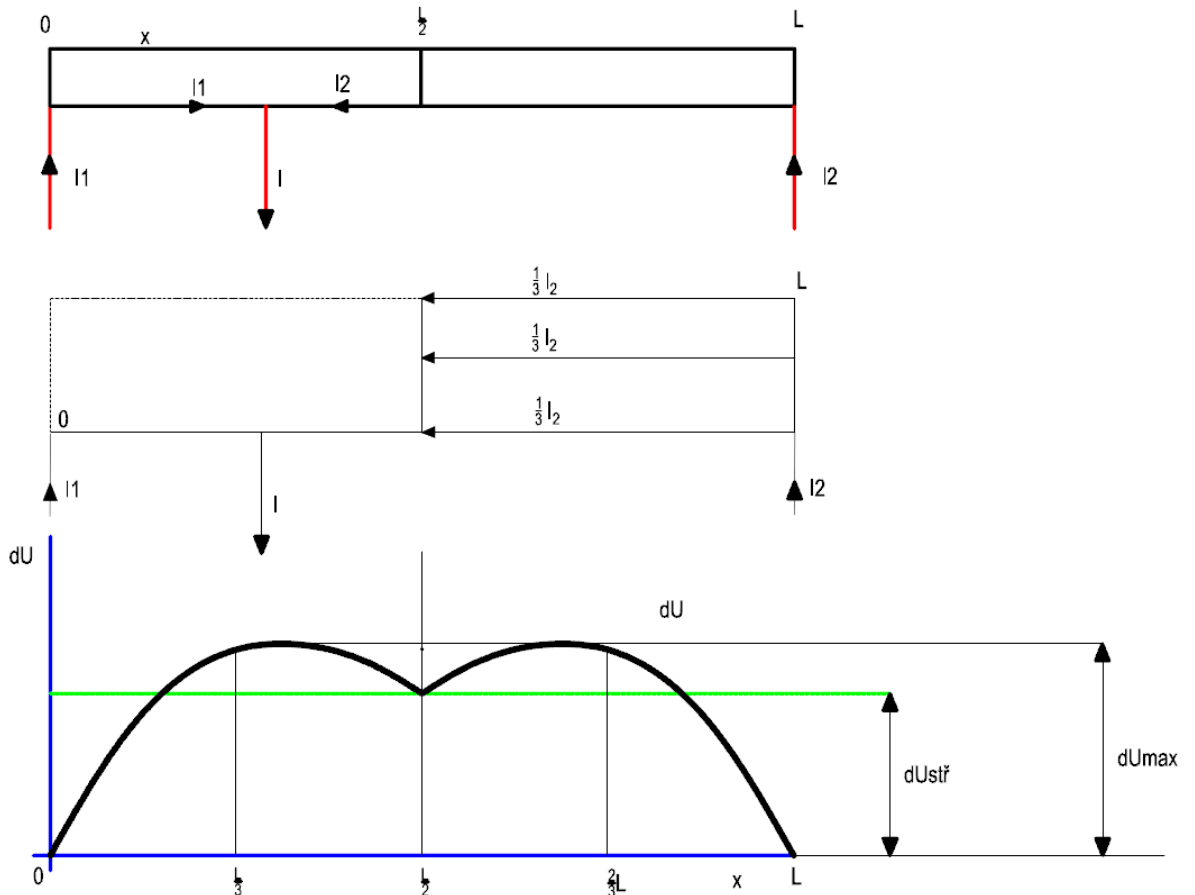
který představuje parabolu s vrcholem uprostřed úseku L , tedy pro $x_m = \frac{L}{2}$ dostaneme vztah

$$\Delta U_{max} = \frac{1}{4} R_o * I * L \leq \Delta U_{dov} \tag{4.19}$$

Střední úbytek napětí určíme z rovnice

$$\Delta U_{stř} = \frac{1}{L} \int_0^L \Delta U * dx = \frac{2}{3} U_{max} = \frac{1}{6} R_o * I * L \quad (4.20)$$

A4) Dvoustranné napájení dvoukolejné trati s trolejovým vedením spojeným uprostřed úseku



Obrázek 12 - Dvoustranné napájení dvoukolejné trati s trolejovým vedením spojeným uprostřed úseku

Při jediném vlaku na dvoukolejné trati oboustranně napájené a uprostřed propojené pomocí spínací stanice bude

$$\Delta U = R_o * x * I_1 = R_o * I_2 \left(\frac{2}{3} L - x \right) \quad a \quad I = I_1 + I_2 \quad (4.21)$$

a z těchto rovnic určíme úbytek

$$\Delta U = R_o * x * I \left(1 - \frac{3}{2} * \frac{x}{L} \right) \quad (4.22)$$

Maximální úbytek obdržíme při $x_m = \frac{L}{3}$

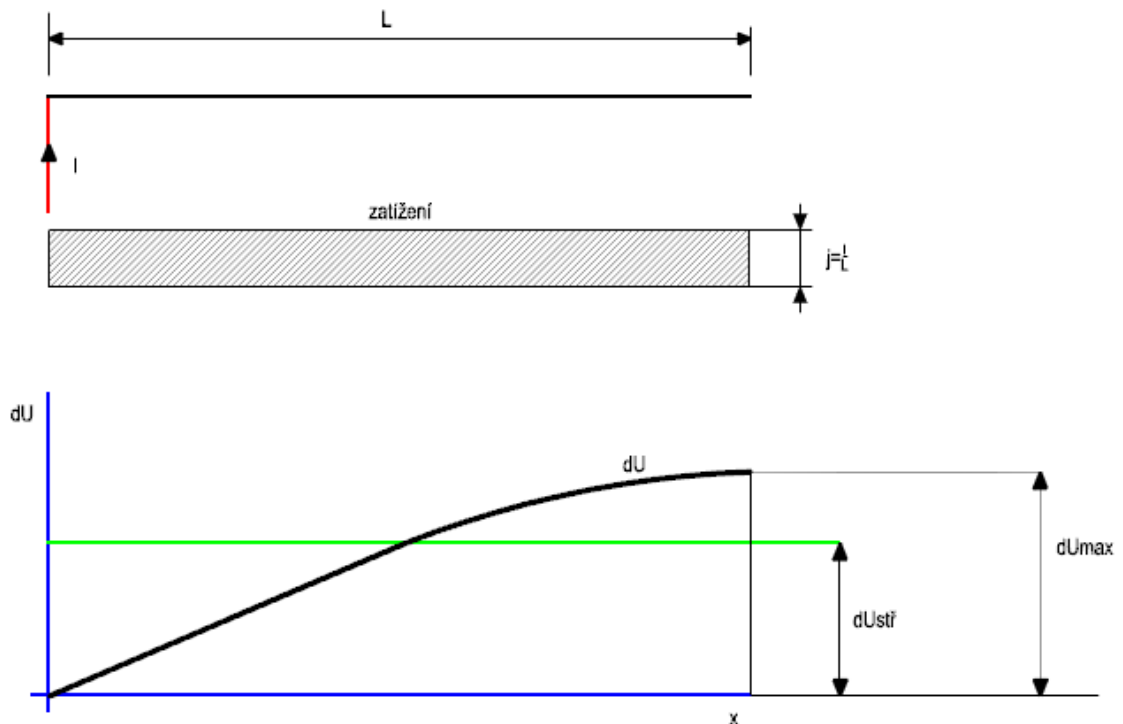
$$\Delta U_{max} = \frac{1}{6} R_o * I * L \quad (4.23)$$

a střední úbytek napětí určíme ze vztahu

$$\Delta U_{stř} = \frac{2R_o * I}{L} \int_0^{\frac{L}{2}} x \left(1 - \frac{3}{2} * \frac{x}{L}\right) * dx = \frac{3}{4} \Delta U_{max} = \frac{1}{8} R_o * I * L \quad (4.24)$$

Na trati je mnoho vlaků, takže proudové zatížení lze považovat za rovnoměrně rozložené

B1) Jednostranné napájení jednokolejné trati



Obrázek 13 Jednostranné napájení jednokolejné trati

Průběh proudu ve vedení je dán výrazem $I - jx$ a průběh příslušného úbytku napětí se určí ze vztahu

$$\Delta U = R_o \int_0^x (I - jx) dx = R_o \left(Ix - \frac{jx^2}{2} \right) = R_o * I * x \frac{2L - x}{2L} [V] \quad (4.25)$$

což je rovnicí paraboly. Největší úbytek ΔU_{max} bude pro $x_m = L$, tedy na konci vedení

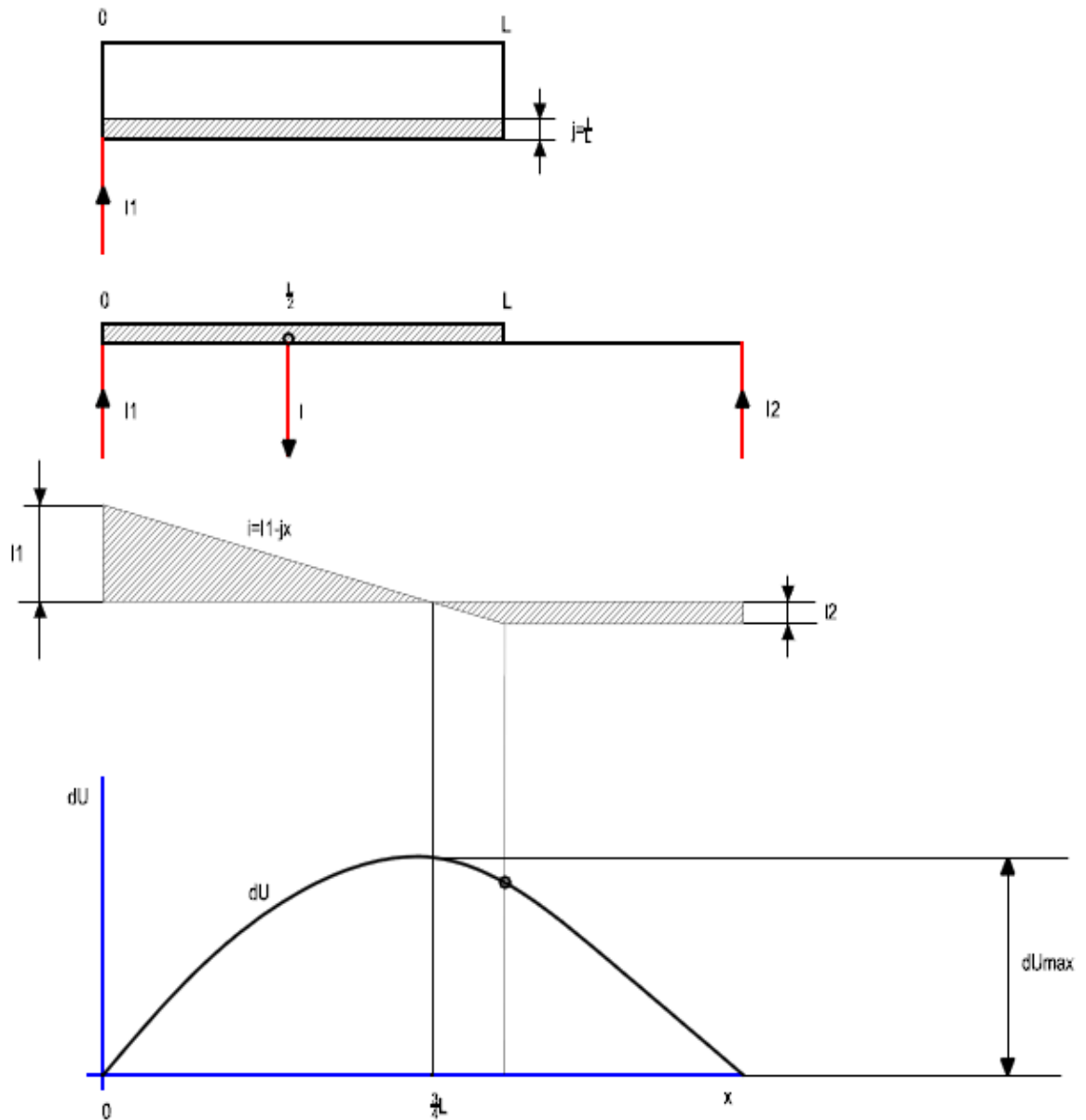
$$\Delta U_{max} = \frac{1}{2} R_o * I * L = \frac{1}{2} R_o * j * L^2 \leq \Delta U_{dov} \quad (4.26)$$

a střední úbytek napětí potom

$$\begin{aligned} \Delta U_{stř} &= \frac{R_o}{L} \int_0^L \left(I * x - \frac{jx^2}{2} \right) dx = \frac{R_o}{L} \left(\frac{1}{2} I L^2 - \frac{1}{6} j * L^3 \right) = \frac{R_o * L * I}{3} \\ &= \frac{R_o * j * L^2}{3} = \frac{2}{3} \Delta U_{max} \end{aligned} \quad (4.27)$$

Maximální úbytek na konci trolejového vedení při rovnoměrně rozloženém zatížení je poloviční ve srovnání s maximálním úbytkem při jednotlivém soustředném zatížení (případ A1).

B2) Jednostranné napájení dvoukolejné trati s trolejovým vedením na konci propojeným



Obrázek 14 - Jednostranné napájení dvoukolejné trati s trolejovým vedením na konci propojeným

Zde je nejdříve potřeba zjistit rozdělení proudů $I = I_1 + I_2$. Rozložené zatížení $j[\text{Am} \cdot \text{km}^{-1}]$ na úseku $0 - L$ nahradíme zatížením $I = jL$ v těžišti rozloženého zatížení ($x = \frac{L}{2}$) a pak můžeme napsat rovnici momentů k bodu 0:

$$2 * L * I_2 - \frac{1}{2} L * I = 0 \tag{4.28}$$

Z této rovnice určíme

$$I_2 = \frac{1}{4} I \text{ a } I_1 = \frac{3}{4} I \tag{4.29}$$

Nyní můžeme potat úbytky napětí:

$$\Delta U = \int_0^x R_o \frac{3}{4} I - jx \, dx = I * R_o x \frac{3L - 2x}{4L} \quad (4.30)$$

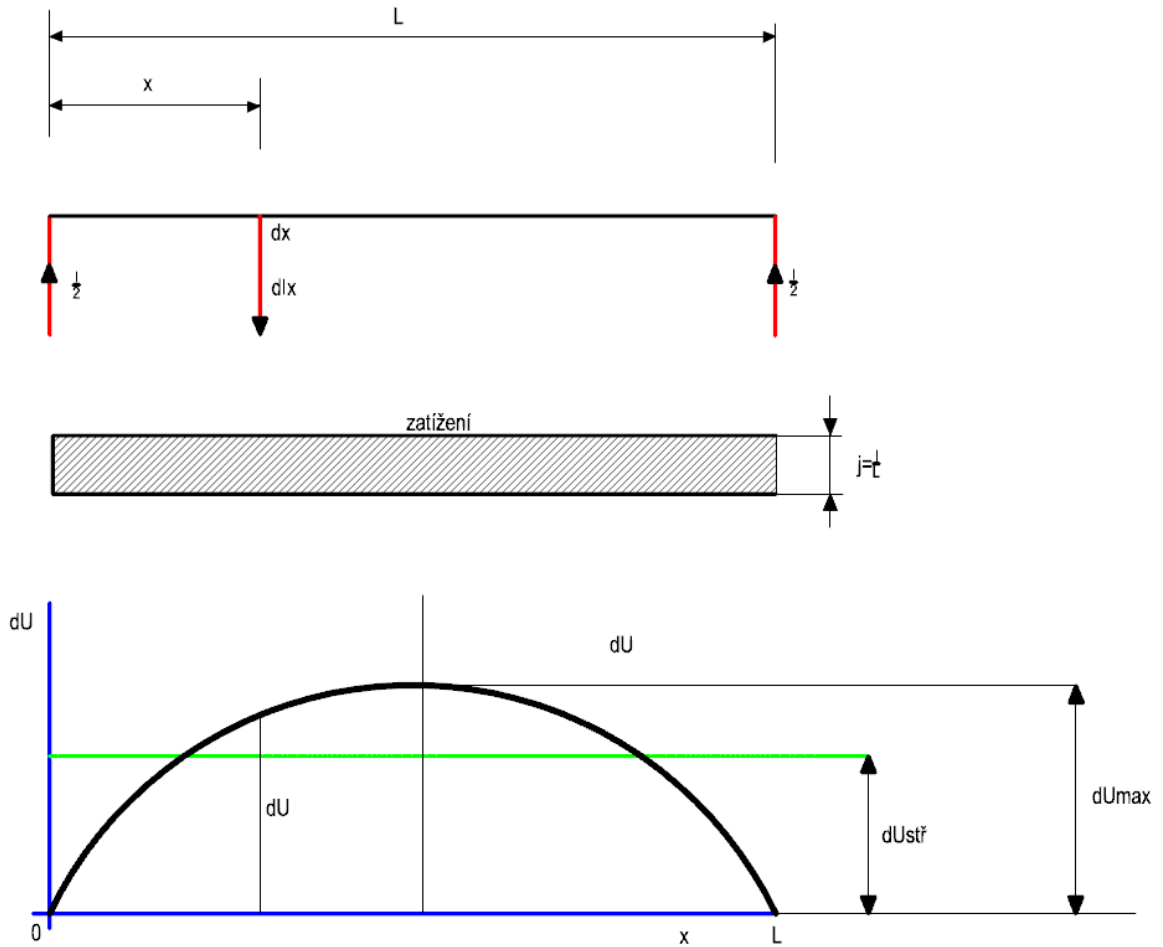
Nyní určíme $x_m = \frac{3}{4}L$ a dosazením do rovnice pro ΔU získáme

$$\Delta U_{max} = \frac{9}{32} I * R_o * L \leq \Delta U_{dov} \quad (4.31)$$

Střední úbytek napětí potom spotme ze vztahu

$$\begin{aligned} \Delta U_{stř} &= \left\{ \frac{1}{2L} \int_0^L I * R_o * x \frac{3L - 2x}{4L} \, dx + \int_0^L \frac{1}{4} I * R_o * x \, dx \right\} \\ &= \frac{1}{6} I * R_o * L = \frac{16}{27} \Delta U_{max} \end{aligned} \quad (4.32)$$

B3) Dvoustranné napájení jednokolejné trati



Obrázek 15 - Dvoustranné napájení jednokolejné trati

Napájecí proudy v místech $x=0$ a $x=L$ budou $I_1 = I_2 = \frac{I}{2}$. Jelikož nekonečně malá změna proudu v místě x bude $dI_1 = -idx$, bude proud procházející vedením v místě x $I_x = I\left(\frac{1}{2} - \frac{x}{L}\right)$.

Přírůstek úbytku napětí je tedy dán vztahem

$$d(\Delta U) = R_o * I_x * dx = R_o * I \left(\frac{1}{2} - \frac{x}{L}\right) dx \tag{4.33}$$

a úbytek v místě x je tedy dán vztahem

$$\Delta U = R_o * I \frac{x(L-x)}{2L} \tag{4.34}$$

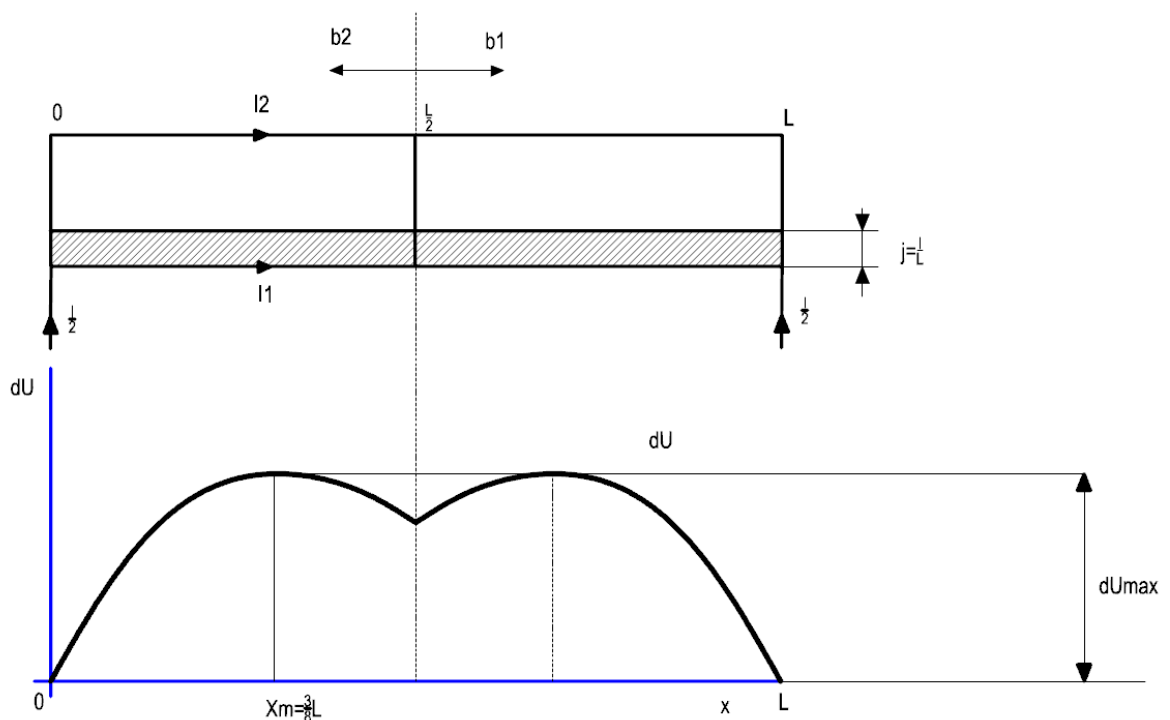
Maximální úbytek napětí je tedy opět parabola s vrcholem uprostřed úseku L a pro $x_m = \frac{L}{2}$ bude tedy

$$\Delta U_{max} = \frac{1}{8} R_o * L * I \leq \Delta U_{dov} \quad (4.35)$$

Střední úbytek napětí jako v předcházejícím případě bude

$$\Delta U_{stř} = \frac{2}{3} \Delta U_{max} = \frac{1}{12} R_o * L * I \quad (4.36)$$

B4) Dvoustranné napájení trati s trolejovým vedením spojeným uprostřed



Obrázek 16 - Dvoustranné napájení trati s trolejovým vedením spojeným uprostřed

Zatížení je zde pouze v jednom směru jízdy (při sklonu nebo stoupání). Podle náčrtku můžeme toto spojení podle naznačené osy rozložit na dvě symetrická spojení případu B2 a řešit stejným způsobem.

Jednotlivé proudy tedy budou $I_1 = \frac{3}{8} I$ a $I_2 = \frac{1}{8} I$.

$$\Delta U = \int_0^x R_o \left(\frac{3}{8} I - jx \right) dx = I * R_o x \frac{3L - 4x}{8L} \quad (4.37)$$

$$x_m = \frac{3}{8}L \quad (4.38)$$

$$\Delta U_{max} = \frac{9}{128}I * R_o * L \leq \Delta U_{dov} \quad (4.39)$$

$$\Delta U_{stř} = \frac{2}{L} \int_0^{\frac{L}{2}} R_o * I * x \frac{3L - 4x}{8L} dx = \frac{5}{96}R_o * I * L = \frac{20}{27}\Delta U_{max} \quad (4.40)$$

4.3 Zkratové proudy stejnosměrné proudové soustavy

Příčinou vzniku zkratových proudů je porucha izolace a spojení částí trakčních vedení nacházejících se pod napětím se zemí anebo s uzemněnými kovovými konstrukcemi (průraz izolace, přemostění izolace, přetržení vodiče apod.).

Normální práce trakčních zařízení je pak narušena dynamickými a tepelnými účinky zkratových proudů a je proto třeba chránit trakční zařízení vhodnými ochranami, které zaručují spolehlivé odpojení zkratem postiženého úseku. Ochrana musí být provedena tak, aby účinkovala pouze při zkratech a nepřípustných přetíženích, avšak nevypínala při největších proudech vyskytujících se v normálním provozu.

Velikost zkratových proudů je různá podle místa zkratu. Je-li v blízkosti napájecí stanice, bude zkratový proud největší. Nejmenší ustálený zkratový proud v napájecí vznikne např. při zkratu na konci jednostranně napájeného vedení nebo při oboustranném napájení, vznikne-li zkrat u druhé měničny. Velikost nejmenšího ustáleného zkratového proudu je dána podílem nejmenšího stejnosměrného napětí při chodu měničny naprázdno a největšího odporu celého zkratového obvodu, tedy

$$I_{Z,MIN} = \frac{U_o min}{R_{Z max}} [A; V; ohm] \quad (4.41)$$

$$R_{Z max} = R_{VO} + R_{KO} \quad (4.42)$$

kde	$R_{Z max}$	- celkový maximální činný odpor	[Ω]
	R_{VO}	- činný odpor trolejového vedení	[Ω]
	R_{KO}	- činný odpor kolejového vedení	[Ω]

Musí tedy platit že

$$\frac{I_{Z,min}}{1,3} > I_{nastav} > 1,2 I_{max} \quad (4.43)$$

5 STŘÍDAVÁ PROUDOVÁ SOUSTAVA

Jednofázová trakční proudová soustava 25 kV, 50 Hz umožňuje přímé napájení trakční sítě z třífázového rozvodu VVN průmyslového kmitočtu 50 Hz, transformací napětí a štěpením fází. Tento způsob je jeden z nejjednodušších, investičně nejlevnější a provozně nejhospodárnější, protože trakční napájecí stanice

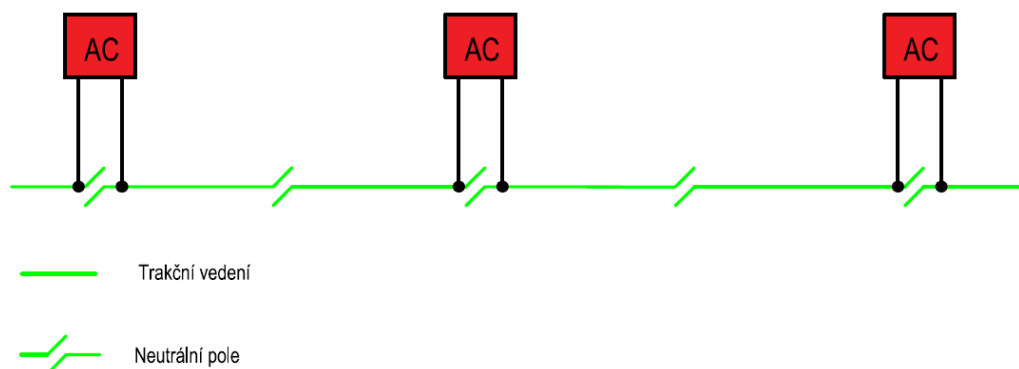
- jsou prosté transformovny s jednofázovou transformací napětí,
- vlivem vysokého napětí v trakční síti mohou být jejich vzdálenosti tak velké, že jejich jmenovitý výkon je dostatečně velký pro hospodárnou a provozně bezpečnou stavbu transformátorů na VVN primární (60 až 150 kV),
- mají malé ztráty, asi jako síťové transformátory 50 Hz,
- mohou být stavěny jako venkovní, tudíž levně a spolehlivě,
- mohou být jednoduše automatizovány a dálkově řízeny, apod.

Nevýhodou je nesymetrické zatěžování trojfázové sítě, nesinusový proud elektrických vozidel s usměrňovači a poměrně velké, nepravidelně kolísající posunutí fázové základní harmonické proudu proti napětí, stěžující jeho kompenzaci statickými kondenzátory. Ke zmírnění těchto nepříznivých účinků musí:

- trojfázová napájecí síť VVN mít dostatečně velký zkratový výkon, aby nesymetrické zatížení nezpůsobilo nedovolené nesymetrie úhlové a napěťové mezi fázemi,
- se zátěž trakční sítě postupně rozdělovat na všechny tři fáze primární sítě, aby se podílely co nejrovnoměrněji na celkovém příkonu.

Předpokladem pro napájení elektrických drah jednofázovou proudovou soustavou 50 Hz je tudíž existence trojfázové energetické sítě VVN dostatečné výkonnosti a rovnoměrné dělení výkonu v trakčních napájecích stanicích nejen na jednotlivé fáze, ale i co do velikosti odběru na jednotky přiměřené zkratovému výkonu sítě VVN nebo odpovídající její schopnosti snést nesymetrické zatížení.

Stále vzestupné používání elektrické energie v průmyslu, ve službách obyvatelstva a v zemědělství má za následek, že se stále zvětšují výkony energetických zdrojů a zesilují přenosová vedení nadřazenými soustavami VVN (220, 380, 500 kV), takže se tím stále zlepšují podmínky pro napájení elektrických drah jednofázových 50 Hz. Střídání fází v trakčních napájecích stanicích má za následek, že trakční síť musí být elektricky rozdělena na úseky nebo oblasti s různým fázovým úhlem napětí. Na stycích musí pak být vkládány neutrální pole do trakčního vedení, které se projíždějí setrvačností ve vypnutém stavu. Toto komplikuje nejen trakční síť, ale i provozní podmínky, zejména při havarijních stavech, např. při vyřazení napáječe. Je proto snahou napájet co nejdélší úseky napětím o stejné fázi, což umožňuje pak dvou i vícestranné napájení. Toto je výhodné nejen z hlediska zvětšení vzdálenosti trakčních napájecích stanic, jejich výkonu a snížení úbytků a ztrát v rozvodu trakčního proudu, ale je i příznivé s ohledem na indukovaná rušivá napětí do souběžných vedení, zejména sdělovacích.

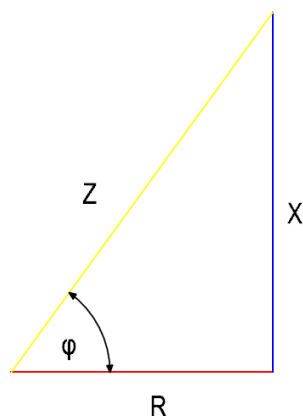


Obrázek 17- Jednostranné napájení - střídavá proudová soustava

Elektrické dělení (neutrální pole) jsou nutné uprostřed úseku mezi napájecími stanicemi, ale i u transformačních stanic z důvodu změn zapojení při poruchových stavech.

5.1 Výpočet úbytku napětí střídavé proudové soustavy

Výpočet jednofázového rozvodu trakčního proudu je daleko obtížnější než u rozvodu stejnosměrného proudu. Zde již nestačí pouze činný odpor, ale musíme počítat s impedancí Z , která se skládá ze složky činného i ze složky reaktančního odporu (Obrázek 18).



Obrázek 18 – Impedance

Z těchto dvou složek můžeme impedanci vyjádřit pomocí vztahů

$$\bar{Z} = Z * e^{j\varphi} = R + jX = Z * \cos\varphi + j * Z * \sin\varphi \quad \left[\frac{\text{ohm}}{\text{km}} \right] \quad (5.1)$$

kde je

Z – impedance	$[\Omega/\text{km}]$
R – činný odpor	$[\Omega/\text{km}]$
X – reaktance	$[\Omega/\text{km}]$ na 1 km trakčního vedení

Dále platí

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad \text{a} \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R} \quad (5.2)$$

Dále musíme počítat s účínkem lokomotiv, který se pohybuje u starých lokomotiv s křemíkovými usměrňovači v závislosti na zatížení a to v mezích 0,75 – 0,83. U nových lokomotiv uvažujeme účíník 0,98.

U stejnosměrných drah jsme zjišťovali ztráty ve vedení ze součinu úbytku napětí a proudu, takže $\Delta P = \Delta U * I$. Dosadíme-li do této rovnice $\Delta U = R * I$, bude $\Delta P = R * I^2$.

U jednofázových drah se doporučuje počítat ztráty ve vedení vždy podle vztahu $\Delta P = R * I^2$. Podobně jako impedanční odpor, i celkový úbytek napětí ΔU se skládá ze dvou složek, a to

$$\Delta U_R = R * I \text{ na činném odporu a}$$

$$\Delta U_x = X * I \text{ na reaktančním odporu.}$$

Jmenovité napětí jednofázové trakční soustavy a dovolené úchytky jsou uvedeny v čl. 12 Předpisů pro elektrická trakční zařízení ČSN 34 1500 a to:

Jmenovité napětí soustavy	25 000 V
Jmenovité napětí trakční transformovny	27 000 V
Nejvyšší přípustné napětí trakčního vedení	27 500 V
Nejnižší přípustné napětí trakčního vedení	19 000 V
a smí klesnout krátkodobě	17 500 V

U jednofázových drah 25 kV, 50 Hz se používá dnes obvykle těchto hlavních sestav:

	100 Cu+50 Bz nebo 100 Cu + 70 Fe,
případně	100 Cu + 70 Fe+ 95 AlFe
a vedlejších sestav	80 Cu + 50 Fe.

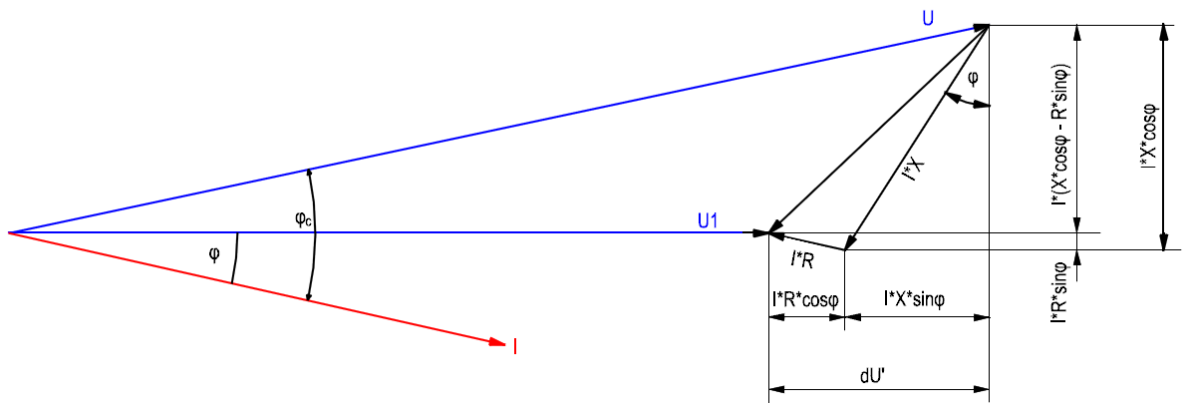
Napětí na vstupu do trakční transformovny se považuje za stálé a u trakčních transformátorů počítáme s napětím nakrátko.

Úbytek napětí ΔU ve vedení je jednofázově posunutý proti přiváděnému napětí U . Jeho absolutní hodnota měřená na spotřebiči (pantografu) je podle vektorového diagramu (Obrázek 19) při fázovém úhlu φ mezi vektorem proudu a napětí.

$$\Delta U = I(R * \cos \varphi + X * \sin \varphi) + \frac{I^2(X * \cos \varphi - R * \sin \varphi)^2}{2 * U_0} = \Delta U' + \Delta U'' \quad (5.3)$$

Většinou ale zanedbáváme při výpočtu úbytek napětí poměrně malou část U'' , tedy

$$\Delta U \doteq \Delta U' = I(R * \cos\varphi + X * \sin\varphi) \quad (5.4)$$



Obrázek 19 – Vektorový diagram jednoho odběru

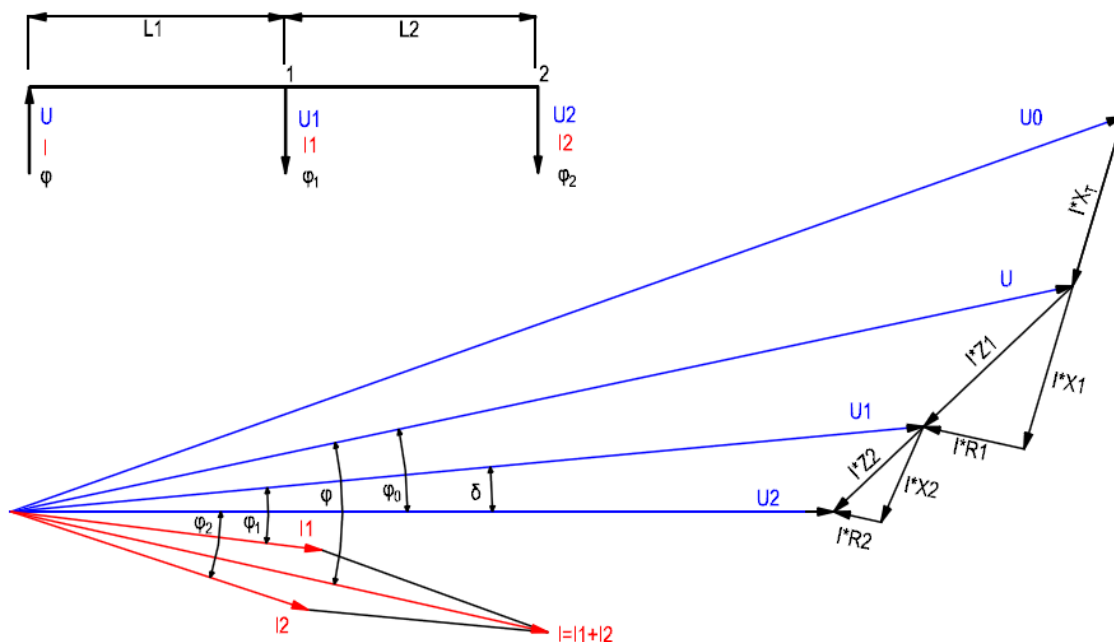
Podle těchto rovnic můžeme počítat úbytek napětí při jednom odběru. R a X jsou zde celkové hodnoty odporu, respektive reaktance pro vzdálenost odběru (vlaku) L [km] od napájecí stanice. Označíme-li odpory, reaktance a impedance pro 1 km indexem „o“, bude

$$R = R_0 * L \quad (5.5)$$

$$X = X_0 * L$$

$$Z = Z_0 * L$$

Je-li v napájeném úseku větší počet odběrů, sčítají se proudy a úbytky napětí vektorově podle Obrázek 20, který ukazuje nejjednodušší případ jednostranně napájeného úseku se dvěma odběry. Zcela obdobný je pak postup při určování úbytku napětí na tratích s větším počtem odběrů.



Obrázek 20 – Vektorový diagram dvou a více odběrů

Pro hodnoty vyznačené na obrázku 20 platí

$$Z_1 = L_1 * Z_0 \quad [ohm] \quad (5.6)$$

$$Z_2 = L_2 * Z_0 \quad [ohm]$$

Abychom mohli určit napětí naprázdno transformátoru, je potřeba znát impedanci samotného transformátoru. Jelikož u transformátoru je $\varphi_t=90^\circ$, pak můžeme složku činného odporu zanedbat a určit pouze reaktanci

$$Z_T = X_T = \frac{U_{jm}}{I_{jm}} * \frac{x_{0\%}}{100} = \frac{U_{jm}^2}{P_{jm}} * \frac{x_{0\%}}{100} \quad [ohm] \quad (5.7)$$

kde $x_{0\%} = U_{k\%}$, tedy napětí nakrátko.

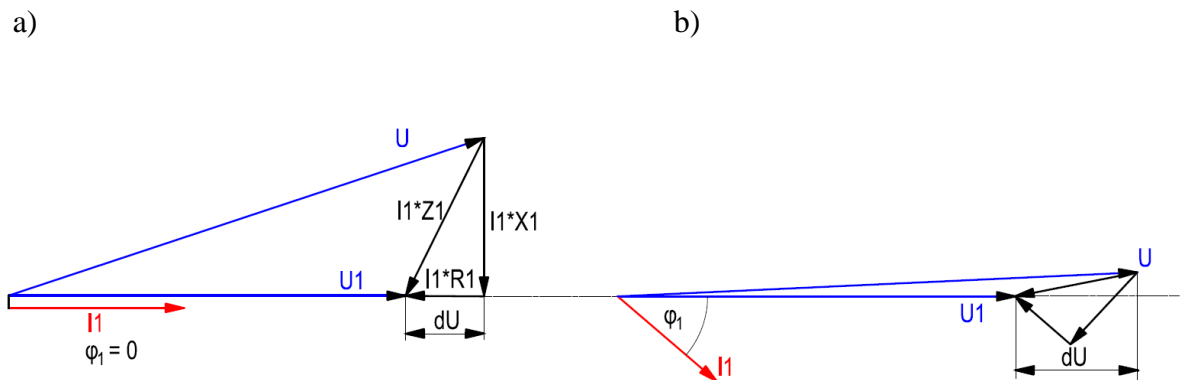
Začínáme s konstrukcí u vlaku, který se nachází v největší vzdálenosti od napájecí stanice. Pro tento vlak si zvolíme napětí v místě odběru U_2 a určíme úbytek pro proud I_2 a délku vedení L_2 . Geometrickým součtem napětí U_2 a úbytku $Z_2 * I_2$ obdržíme napětí U_1 v místě odběru proudu pro

první vlak. V úseku trati L_1 teče vedením proud $\bar{I} = \bar{I}_1 + \bar{I}_2$, pro který sestrojíme úbytkový trojúhelník a součtem napětí U_1 a příslušného úbytku obdržíme napětí na sekundárních přípojnicích U v napájecí stanici. Nyní k tomuto napětí přičteme ještě úbytek napětí v transformátoru při chodu naprázdno U_0 . Je-li takto zjištěné napětí $U_0 = 27$ kV, což je napětí naprázdno podle předpisů ČSN 34 1500, jsou poměry vyhovující.

U jednofázových drah s průmyslovým kmitočtem počítáme vždy s jednostranným napájením. Výpočet při větším počtu odběrů je poměrně složitý a je proto výhodné použít zde pro výpočet síťových modelů. Z předchozího příkladu vidíme, že příčným propojováním trolejových vedení dvoukolejné trati se snižuje impedance vedení velmi značně a snižují se i úbytky. Z diagramu nakreslených v obr. 21. vidíme vliv $\cos \varphi$ na úbytek napětí:

a) je $\cos \varphi = 1$

b) je $\cos \varphi < 1$.



Obrázek 21 – Vektorový diagram úbytku napětí v závislosti na účinníku

K přibližným výpočtům můžeme zjednodušit postup tím, že zanedbáme poměrně malý úhel mezi vektory dílčích napětí u spotřebičů (δ) a měříme pak φ_1 , a tak i φ_2 a další od vektoru U_2 . V tomto případě můžeme použít zjednodušení

$$\Delta U_{max} \geq \sum_{k=1}^n I_k * R_k * \cos \varphi_k + \sum_{k=1}^n I_k * X_k * \sin \varphi_k = \Delta U \quad (5.8)$$

- kde I_k - proud odebíraný k-tým vozidlem
 R_k - činný odpor vedení od napájecí stanice až k místu k-tého vozidla
 X_k - reaktance vedení od napájecí stanice až k místu k-tého vozidla
 $\cos \varphi_k$ - účiník k-tého vozidla

Je-li úhel φ_k všech odběrů stejný a impedance vedení také, tak potom platí zjednodušení

$$\Delta U_{max} \geq [R_o * \cos\varphi + X_o * \sin\varphi] * \sum_{k=1}^n I_k * L_k = \Delta U \quad (5.9)$$

kde jsou I_k proudy vozidel a L_k jejich vzdálenosti od napájecí stanice. V tomto případě pak počítáme úbytky napětí stejně, jako ve stejnosměrném obvodu, pouze s tím rozdílem, že nahradíme činný odpor na 1 km vedení R výrazem

$$Z_o = R_o * \cos\varphi + X_o * \sin\varphi \quad \left[\frac{\text{ohm}}{\text{km}} \right] \quad (5.10)$$

Fázový úhel φ_o mezi vektorem napětí U_n a U_o v napájecí stanici určíme ze vztahu

$$\operatorname{tg}\varphi_o = \frac{\sum_{k=1}^n I_k * X_k * \cos\varphi_k - \sum_{k=1}^n I_k * R_k * \sin\varphi_k}{U_o} \quad (5.11)$$

Je-li $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_k = \varphi$, dále X_o a R_o jsou stálé hodnoty, potom platí

$$\operatorname{tg}\varphi_o = \frac{[X_o \cos\varphi - R_o \sin\varphi] \sum_{k=1}^n I_k * L_k}{U_o} \quad (5.12)$$

Fázový úhel vektoru proudu I proti napětí U_o je v napájecí stanici

$$\varphi_c = \varphi_o + \varphi \quad (5.13)$$

5.2 Kontrola oteplení vodičů

U stejnosměrných drah, pokud se jedná o dlouhá vedení, bývá rozhodujícím činitelem úbytek napětí a většinou průřez určený na základě dovoleného úbytku vyhovuje i tepelně. U jednofázových vedení jsou průřezy poměrně malé, a proto je třeba přezkoumat proudové zatížení, aby nenastal případ nepřiměřeného oteplení. Využijeme zde kontrolu proudu v nejnepříznivějším místě, tj. v blízkosti napájecí stanice. Dovolené proudové zatížení vodičů i sestav trolejového vedení je uvedeno v předpisech pro trakční vedení ČSN 34 1540, příloha 5. Pro jednofázovou trakční soustavu jsou tam uvedena tato zatížení:

100 Cu + 70 Fe	638 A
80 Cu + 50 Fe	535 A
100 Cu + 70 ALFE 6	943 A
100 Cu + 95 ALFE 6	848 A
100 Cu + 50 Bz	760A
100 Cu + 70 Fe + 120 Al	1027 A

Uvažujeme teplotu 80° C.

5.3 Zkratové proudy střídavé proudové soustavy

V rozvodu trakčního proudu je velikost zkratového proudu rozhodující pro volbu a seřízení nadproudové ochrany. Pokud se nekombinuje nadproudová ochrana s fázovým členem (impuls k ochrannému vypínání je závislý na velikosti proudu a fázovém posunutí proudu), musí být proud nejvzdálenějšího zkratu o ochrannou hodnotu bezpečně větší, než je maximální provozní proud napáječe.

Vzhledem k poměrně velké reaktanci transformátoru počítáme nejdříve zkratový proud za předpokladu nekonečně tvrdé primární sítě, tedy při konstantním primárním napětí a v druhém přiblížení pak a uvažováním vlivu primárního úbytku napětí.

Náhradní reaktance napájecí soustavy VVN na straně $U_2=27$ kV zjistíme ze zkratového výkonu ze vztahu

$$X_S = \frac{1,1 U_z^2}{P_z} \quad [ohm] \quad (5.14)$$

Impedance transformátoru bude

$$\bar{Z}_T = R_T + jX_T = \frac{\Delta P_{Cu}}{I^2} + j \frac{U^2 * u_k\%}{P_T * 100} \quad [ohm] \quad (5.15)$$

kde ΔP_{Cu} - jsou ztráty v mědi transformátoru při jmenovitém proudu I [W]

R_T - redukovaný činný odpor [Ω]

X_T - redukovaná reaktance transformátoru [Ω]

U_2 - sekundární napětí [V]

$u_{k\%}$ - napětí nakrátko transformátoru

P_T - jmenovitý výkon transformátoru [W]

Impedance trakčního vedení bude

$$\bar{Z}_V = R_V + jX_V \quad (5.16)$$

Pro zkrat na konci vedení, tedy ve vzdálenost L_{max} od transformovny

$$R_V = R_o * L_{max} \quad a \quad X_V = X_o * L_{max} \quad (5.17)$$

Celková impedance obvodu bude

$$\bar{Z}_{max} = (R_T + R_V) + j(X_S + X_T + X_V) \quad (5.18)$$

a zanedbáme-li činný odpor vinutí transformátoru bude

$$\bar{Z}_{max} = R_V + j(X_S + X_T + X_V) \quad (5.19)$$

a dále za předpokladu nekonečně tvrdé primární sítě bude

$$\bar{Z}_{max} = R_V + j(X_T + X_V) \quad (5.20)$$

Ve výpočtu za předpokladu konstantního primárního napětí bude minimální zkratový proud

$$I_{zmin} = \frac{U_2}{\sqrt{R_V^2 + (X_T + X_V)^2}} \quad (5.21)$$

6 ENERGETICKÉ ZTRÁTY TRAKČNÍHO VEDENÍ

Poměrně snadno lze určit okamžité hodnoty ztrát jako rozdíl okamžitého výkonu měřírny a okamžitého příkonu potřebného pro jízdu všech vlaků.

Celkový příkon pro všechny vlaky v napájeném úseku bude v daném okamžiku obecně:

$$P_c = \sum_{k=1}^{k=n} U_k * I_k = \sum_{k=1}^{k=n} (U - \Delta U_k) * I_k \quad [W] \quad (6.1)$$

kde je U_k - napětí v místě odběru proudu daným vlakem, [V]

ΔU_k - úbytek napětí v místě odběru, [V]

U - napětí na přípojnicích napájecí stanice, [V]

I_k - proud daného vlaku, [A]

k - číslo vlaku v napájecím úseku,

n - celkový počet vlaků v napájeném úseku.

Výkon napájecí stanice bude v daném okamžiku

$$P_m = \sum_{k=1}^{k=n} U * I_k \quad [W] \quad (6.2)$$

Ztráty definované jako rozdíl okamžitého výkonu napájecí stanice a okamžitého příkonu všech vlaků v napájeném úseku určíme z rovnicí

$$\Delta P = P_m - P_c = \sum_1^n U * I_k - \sum_1^n (U - \Delta U_k) * I_k = \sum_1^n \Delta U_k * I_k \quad [W] \quad (6.3)$$

Více než okamžité hodnoty nás zajímají střední hodnoty ztrát, které jsou důležité z hlediska energetické bilance. Snadno se dá dokázat, že tyto ztráty lze jednoduše určit ze vztahu

$$\Delta P_{stř} = \Delta U_{stř} * I \quad [W; V, A] \quad (6.4)$$

Známe-li ztráty a příkon, můžeme určit účinnost rozvodu, a to okamžitou i střední, dle rovnic:

Při zatížení jedním vlakem bude účinnost

- okamžitá

$$\eta = \frac{(U - \Delta U)I}{U * I} = 1 - \frac{\Delta U}{U} \quad (6.5)$$

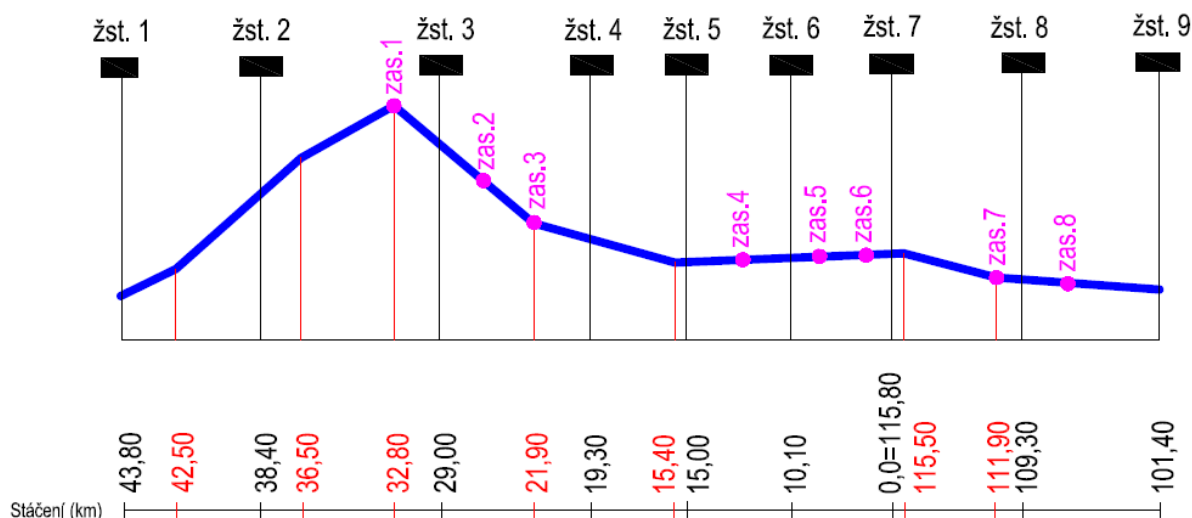
- střední při průjezdu vlaku s konstantním středním odběrem I [A], tratí L [km] a stálou rychlostí v [km/h] za dobu T [h]

$$\eta_{stř} = \frac{\int_0^T (U - \Delta U) I * dt}{U * I * T} = 1 - \frac{1}{U * T} \int_0^T \Delta U * dt \quad (6.6)$$

a použijeme-li vztahy $L = v * T$ a $x = v * t$ dostaneme

$$\eta_{stř} = 1 - \frac{\Delta U_{stř}}{U} \quad (6.7)$$

7 INFRASTRUKTURA VÝPOČETNÍHO MODELU



Číslo úseku	1	2	3	4	5	6	7	8
Délka úseku (km)	1,3	6,0	3,7	10,9	6,5	15,7	3,6	10,5
Redukovaný sklon (%)	+5,0 -4,4	+13,9 -12,9	+4,1 -2,9	-11,6 -13,2	-6,3 +7,3	+1,4 -1,3	-6,7 +6,8	-1,5 +1,7

- Železniční stanice
- Železniční zastávka
- Redukovaný profil trati
- Změna redukovaného profilu úseku

Obrázek 22 – Redukovaný profil navrhnuté trati

Základním podkladem pro návrh infrastruktury železniční trati je náhradní podélný výškový profil navrhovaného úseku. Úpravou i zjednodušením skutečného profilu získáme náhradní profil trati s delšími úseky stálých sklonů (Obrázek 22), z kterého budeme vycházet.

Trať mezi železniční stanicí (dále žst.) 1 až žst. 9 je v celé délce jednokolejná a má dvě části značně odlišného charakteru. V žst. 7 dochází ke změně kilometrového značení tratě.

Úsek žst. 1 až žst. 5 o délce 28,8 km vede zřejmě kopcovitým terénem, jsou zde menší poloměry oblouků a převažující traťová rychlost je uvažována 120 km/h. Redukované stoupání z obou stran k zastávce 1 je 13-14 %, při třech stanicích a třech zastávkách je průměrná vzdálenost osobních vlaků cca 4,1 km – střední energetická náročnost.

Úsek žst. 5 až žst. 9 (délka cca 29,4 km) vede rovinným terénem (pouze v krátkém úseku je redukované stoupání 6,8 %). Kromě koncových je zde 5 zastávek a 3 železniční stanice, což znamená při jejich průměrné vzdálenosti 3,25 km značnou energetickou náročnost osobních vlaků. Pro účel energetických výpočtů uvažujeme stálou rychlost 160 km/h.

Tabulka 2 – Polohy TM

Typ	Označení	Poloha	Poznámka
Stanice/Zastávka		žkm ¹⁾	
Stanice	1	43,80	
Stanice	2	38,40	
Zastávka	1	32,80	
Stanice	3	29,00	
Zastávka	2	23,35	
Zastávka	3	21,90	
Stanice	4	19,30	
Stanice	5	15,00	
Zastávka	4	12,95	
Stanice	6	10,10	
Zastávka	5	5,86	
Zastávka	6	2,55	
Stanice	7	0,00 = 115,80	Změna
Zastávka	7	111,90	
Stanice	8	109,30	
Zastávka	8	106,64	
Stanice	9	101,40	

¹⁾žkm - železniční kilometr

Dalším základním podkladem pro výpočet je definování rozsahu železniční dopravy závislé trakce.

Rozsah dopravy :

Úsek žst. 5 – žst. 9

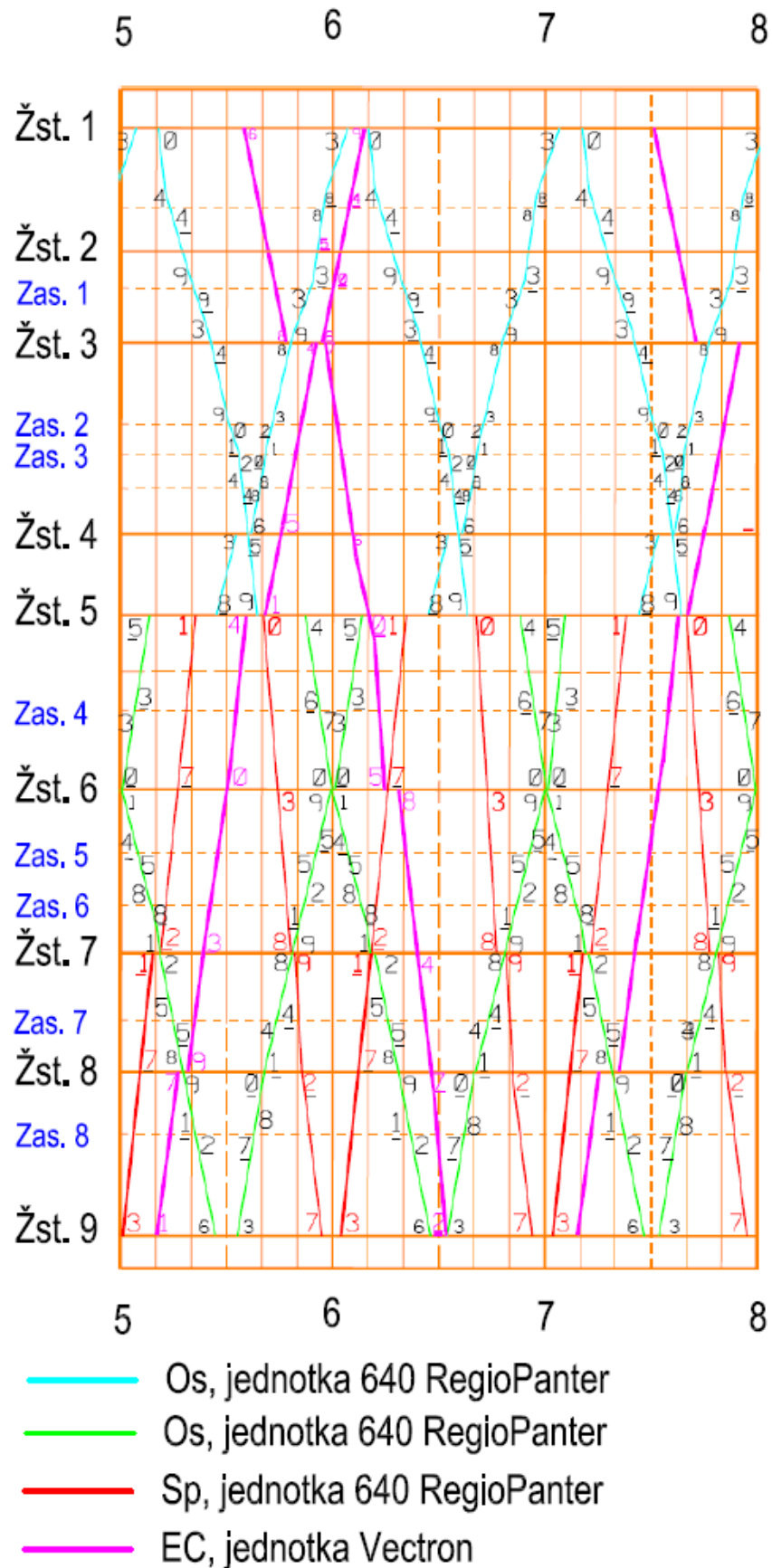
- 56 vlaků v pracovní dny, z toho vlaky typu Os v intervalu 60 minut celodenně, celkem 19 párů zastavuje ve všech železničních stanicích a zastávkách, vlaky typu Sp v intervalu 60 minut ve špičkách pracovních dnů (5-8h), zastavení v žst. 7, žst. 5, celkem 9 párů vlaků

úsek žst. 1 – žst. 5

- 28 vlaků v pracovní dny, z toho pokračování vlaků typu Sp z žst. 5 – žst. 9 dále jako vlaky ty u Os, zastavují ve všech železničních stanicích a zastávkách intervalem 60 minut ve špičkách pracovních dnů (5-8h), vlaky typu Osv pracovních dnech v době 5 až 8 hod zastavují ve všech železničních stanicích a zastávkách, intervalem 120 minut 5 párů vlaků, dále vlaky typu R zastavují pouze v žst. 3, 5, 6 a 8 s intervalem 120 minut 1 pár vlaků.

Z těchto podkladů byl zpracovaný teoretický grafikon vlakové dopravy (dále jen GVD) – obr.23, ten nám bude později sloužit pro modelování jízdního řádu v simulačním programu OpenTrack. GVD je grafické zobrazení pohybu dopravních spojů po trase, tedy grafická forma jízdního řádu. Spoje jsou znázorněny pomocí úseček na grafu kartézských souřadnic, vodorovná osa zobrazuje čas v rámci provozního dne, svislá osa označuje polohu daného spoje, železniční stanice a zastávky. Jízda jedním směrem se zobrazuje šikmou úsečkou směrem doprava nahoru, opačný směr úsečkou směřující doprava dolů. Stání vlaku je zobrazení vodorovnou čarou.

Důležité při návrhu GVD je uvědomit si, že vlaky jedoucí v opačném směrem se mohou míjet pouze v železničních stanicích, kde jsou zhotoveny vedlejší objízdné koleje.



Obrázek 23 – Teoretický GVD

7.1 OpenTrack - výpočetní model

Pro simulaci výpočetního modelu je nutné navrhnoutou infrastrukturu a dopravu implementovat do programu OpenTrack.

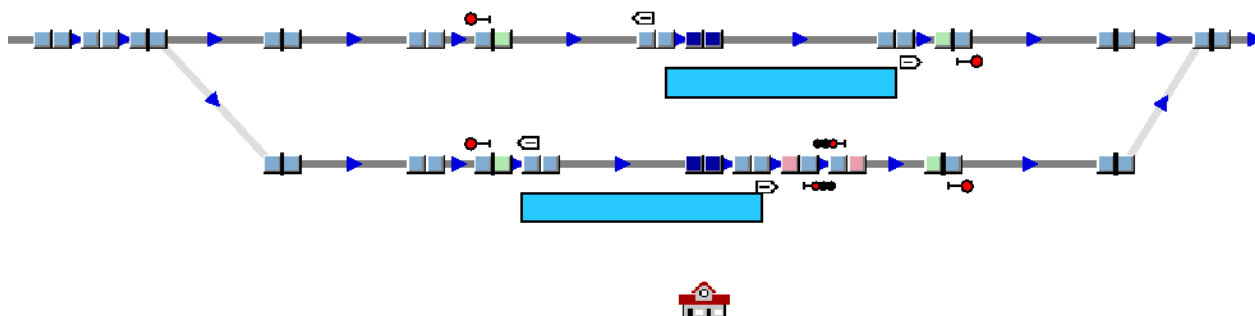
OpenTrack slouží k objektově orientovanému modelování železnic. Dnes je nástroj pro simulaci železnice OpenTrack používán železničními podniky, správci infrastruktury, oborem dodavatelů železnic, konzultanty a univerzitami v nejrůznějších zemích.

OpenTrack podporuje tyto druhy úkolů:

- Stanovení požadavků na železniční infrastrukturu
- Analýza kapacity tratí a stanic
- Konstrukce jízdního řádu
- Analýza vlivu zpoždění, poruch vozidel a infrastruktury na železniční provoz
- Kalkulace spotřeby energie a příkonu na jízdu vlaku

Data o síti

OpenTrack popisuje železniční síť zvláštními grafy nazývanými dvoubodové grafy. Uživatel může topologii sítě editovat graficky. Každý prvek grafu je popsán několika atributy. Například hrana je popsána svou délkou, sklonem, maximální rychlostí pro různé kategorie vlaků. Dále můžeme vytvořit a spravovat objekty na hranách a vrcholech, jakož i návěstidla, výhybky, stanice a cesty. Následující obrázek zobrazuje část topologie železniční stanice 7.



Obrázek 24 – Zobrazení železniční stanice v dvoubodovém grafu programu OpenTrack

Data o vozidlech

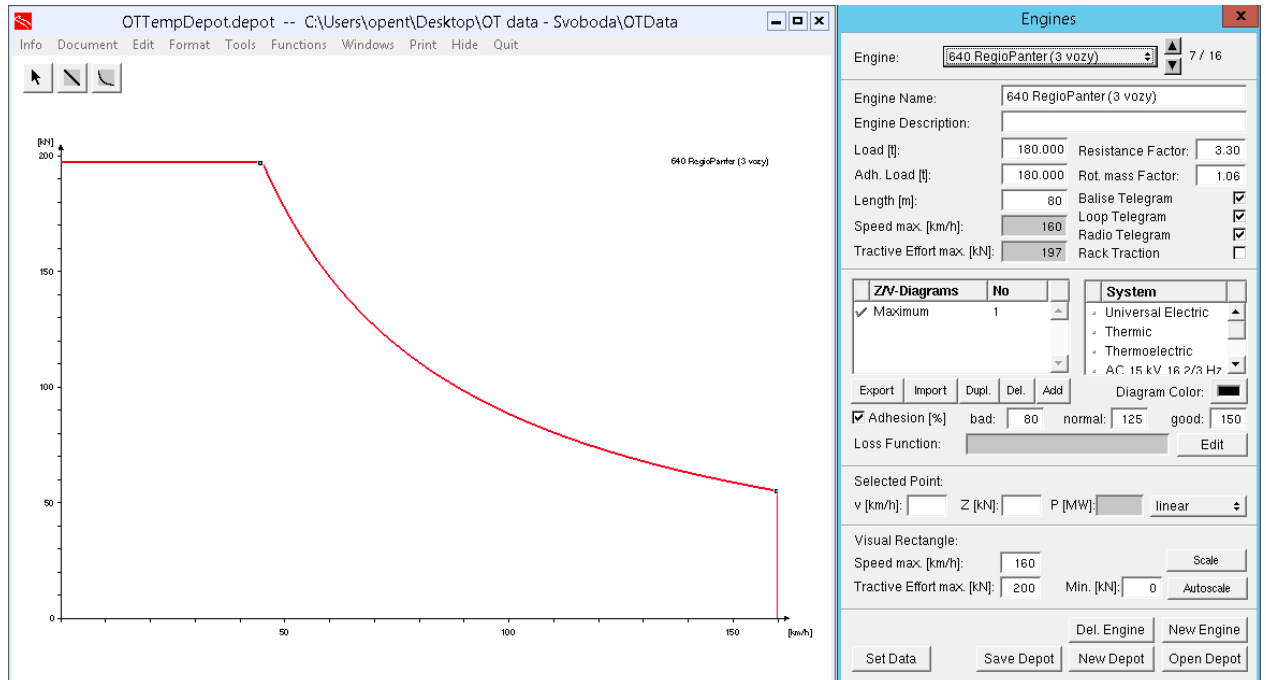
OpenTrack ukládá technické vlastnosti každé lokomotivy, včetně diagramu trakční charakteristiky, hmotnosti, délky, součinitele adheze a trakční soustavy. Databáze ukládá lokomotivy ve skupinách nazývaných depa. Simulovaný vlak používá jednu nebo více lokomotiv z depa společně s několika osobními nebo nákladními vozy.

Nyní tedy můžeme nadefinovat technické parametry elektrických vlakových jednotek využitých v dopravním modelu, tedy pro jednotku řady RegioPanter 640 a Siemens Vectron.

RegioPanter 640

Technické parametry

- Maximální rychlost 160 km/h
- Hmotnost s cestujícími 180 t
- Adhézni hmotnost 180 t
- Adhéze 80 %
- Maximální tažná síla 200 kN
- Délka soupravy 80 m

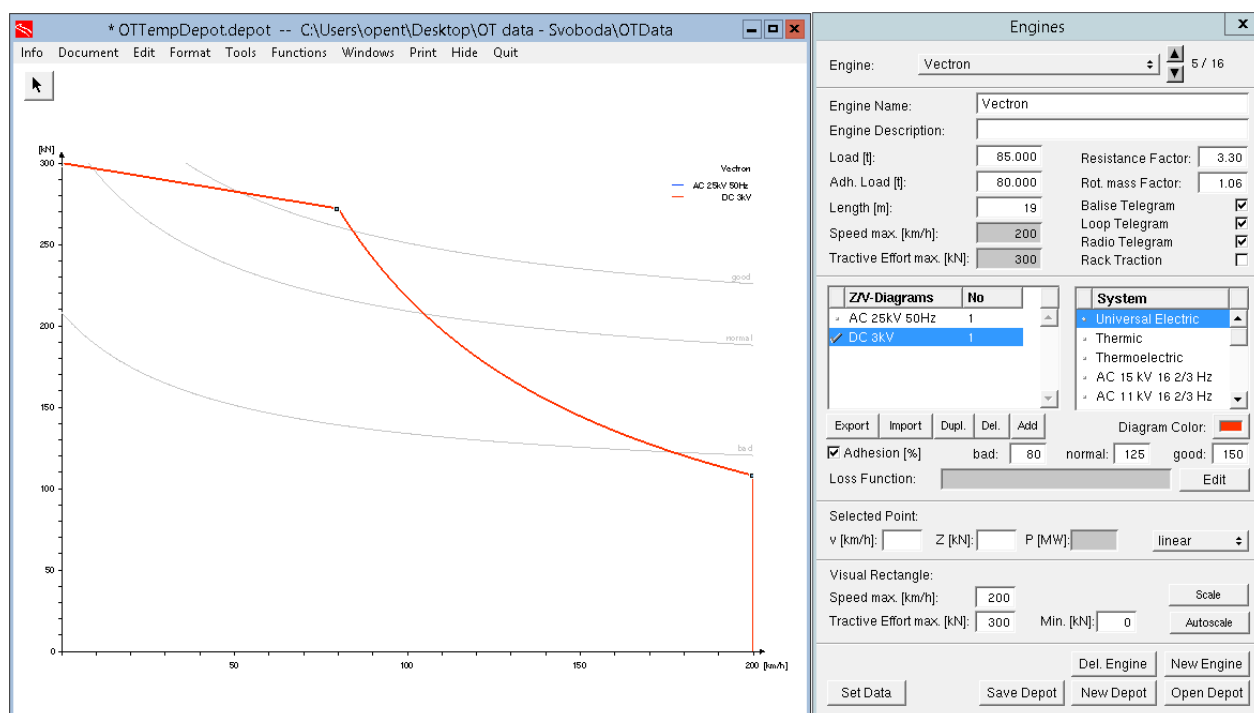


Obrázek 25 – Provozní charakteristika soupravy RegioPanter 640

Siemens Vectron

Technické parametry

- Maximální rychlost 200 km/h
- Hmotnost 85 t
- Adhézní hmotnost 80 t
- Adhéze 80 %
- Maximální tažná síla 300 kN
- Délka jednotky 19 m



Obrázek 26 – Provozní charakteristika lokomotivy Siemens Vectron

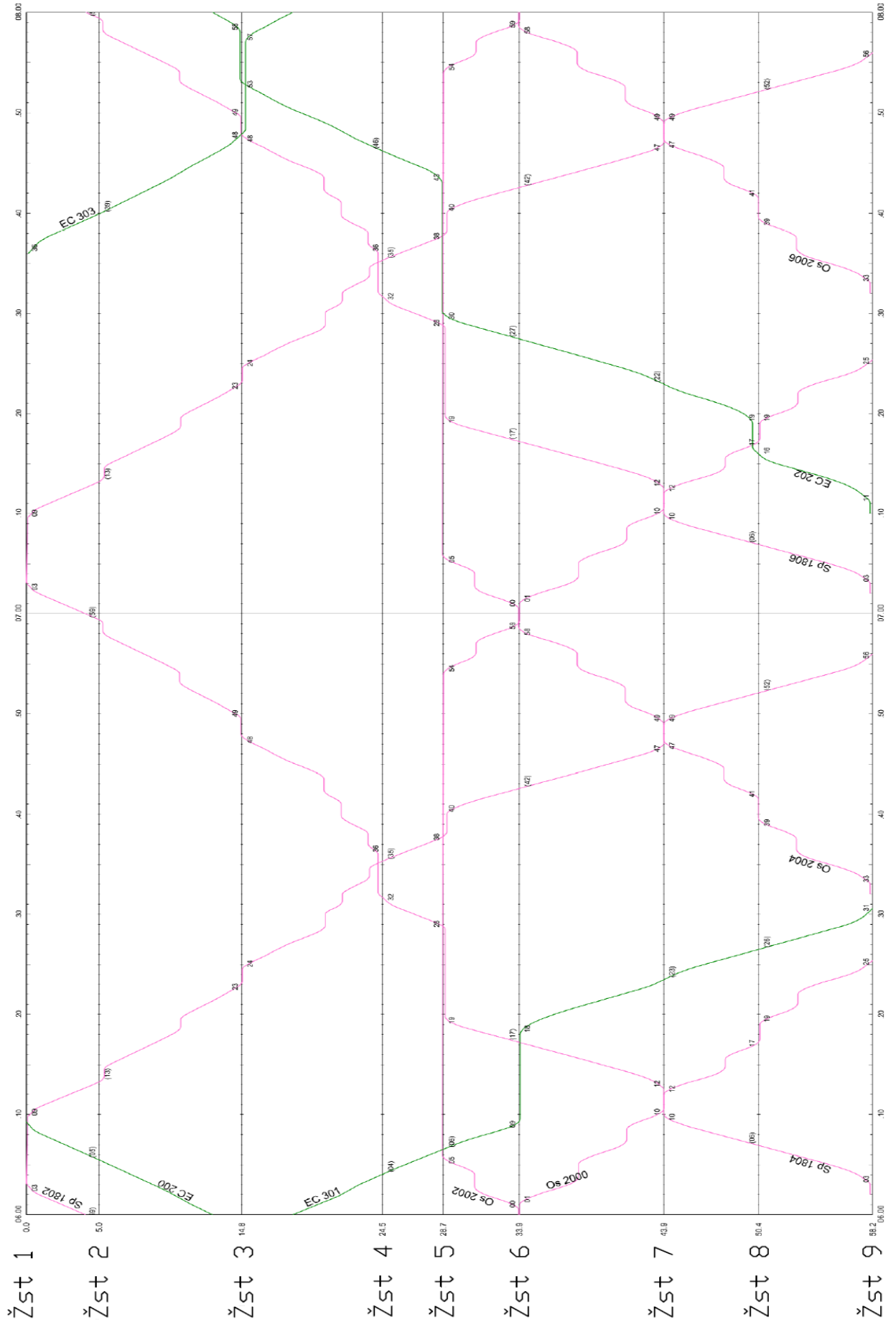
Data jízdního řádu

Databáze jízdního řádu ukládá informace o každém vlaku v každé stanici, včetně času příjezdu a odjezdu, minimální délce pobytu a přípojkách na další vlaky.

Simulace

Určené vlaky vyjedou podle jízdního řádu na železniční síť. Během simulace OpenTrack vypočítává pohyby vlaků podle omezení návěstních systémů a jízdního řádu. Po proběhnutí simulace může OpenTrack analyzovat a zobrazit výsledná data formou GVD.

Zpracované a odsimulované výsledné grafické zobrazení jízdního řádu je zobrazeno na obr. 27.



Obrázek 27- Výstupní GVD z programu OpenTrack

8 NÁVRH NAPÁJENÍ STEJNOSMĚRNOU PROUDOVOU SOUSTAVOU

Prvotní podklad sloužící k rozmístění trakčních měníren (dále jen TM) je norma ČSN EN 50388 ed.2 Tabulka D. 2, která nám udává doporučenou vzdálenost mezi TM. Norma udává minimální vzdálenost mezi TM 10 km a maximální vzdálenost 15 km v závislosti na velikosti výkonu tratě pro napětíovou hladinu 3 kV.

Dle těchto parametru bylo tedy navrženo umístění TM:

Tabulka 3 – Poloha navržených TM v programu OpenPowerNet

Označení TM	Poloha
	žkm
TM 1	43,80
TM 2	32,80
TM 3	15,00
TM 4	0,00=115,80
TM 5	101,40

TM 1 a TM 5 byly navrženy na koncích řešené železniční tratě. Dále TM 2 byla umístěna z topografického hlediska do železniční zastávky 1 (žkm 32,80), tedy v nejvyšším bodě stoupání tratě. V těchto místech z důvodu nejstrmějšího stoupání očekáváme nejvyšší potřebný elektrický výkon a tedy i nejvyšší úbytek napětí na trolejovém vedení, který je při návrhu stejnosměrného napájení jednou z limitujících veličin. Vzdálenost meziměřírenského úseku TM 1 – TM 2 činí 11 km. TM 3 byla navržena na úpatí stoupání v žst. 5 ve vzdálenosti 17,8 km od TM 2. Poslední TM byla umístěna v žst. 7, meziměřírenský úsek TM 3 – TM 4 je 15 km a TM 4 – TM 5 14,4 km.

Pro orientační kontrolu rozmístění trakčních měníren provedeme výpočet maximálního úbytku napětí každého meziměřírenského úseku. K tomuto výpočtu je nutné znát navrhnutou trakční sestavu, činný odpor zpětné cesty (kolej) a činný odpor zvolené trakční sestavy, tedy trolejového vedení, nosného lana a popřípadě zesilovacího vedení. Trolejové vedení uvažujeme paralelně propojené.

Pro výpočet byla zvolena trakční trolejová sestava „S“, pro stejnosměrnou trakční soustavu 3 kV **TR 150Cu mm² + NL 120Cu mm² + ZV 120Cu mm²**, která se skládá z trolejového měděného drátu o průměru vodiče 150 mm², dále měděného nosného lana o průměru vodiče 120 mm² a zesilovacího měděného lana o průměru 120 mm². Zesilovací vedení je umístěno na izolátorech podél trakčního vedení a je paralelně spojeno s trolejovým vedením.

Parametry trakční sestavy „S“ :

Odpor koleje R65	4	<i>mΩ/km</i>
Odpor drátu 150Cu mm ²	122	<i>mΩ/km</i>
Odpor lana 120Cu mm ²	150	<i>mΩ/km</i>
Výsledný odpor sestavy „S“	40	<i>mΩ/km</i>

Odpor koleje a prvků trakční sestavy „S“ je uvažován z Předpisu SŽDC (ČSD) SR 34(E) s úpravou dle dopisu zn.: 21480/2017-SŽDC-O14.

Při orientačním výpočtu maximálního úbytku napětí v meziměřírenském úseku uvažujeme jako spotřebič elektrickou jednotku Vectron (vlak typu EC), která se nachází přesně v polovině meziměřírenského úseku při plném využití maximálního výkonu, v tomto případě tedy **6,4 MW**.

Nyní tedy postupuje dle výpočtu dvoustranného napájení jednokolejné trati, viz kapitola 4.2., napětí na troleji nesmí klesnout pod 2,4 kV dle normy EN 50163.

Výpočet byl proveden pro všechny úseky (Tab.4), příklad výpočtu pro meziměřírenský úsek TM 1 – TM 2 :

$$\Delta U_{max} = \frac{1}{4} R_o * I * L \leq \Delta U_{dov} \quad (8.1)$$

$$R_o = R_{TV} + R_{kolej} = 0,040 + 0,004 = 0,044 \Omega/km \quad (8.2)$$

$$I = \frac{P}{U} = \frac{6,4 \text{ MW}}{3 \text{ kV}} = 2133,3 \text{ A} \quad (8.3)$$

$$\Delta U_{max} = \frac{1}{4} * 0,044 * 2133,3 * 11 = 258,09 \text{ V} \quad (8.4)$$

(8.5)

$$U_{min} = U - \Delta U_{max} = 3000 - 258,09 = 2741,91 \text{ V}$$

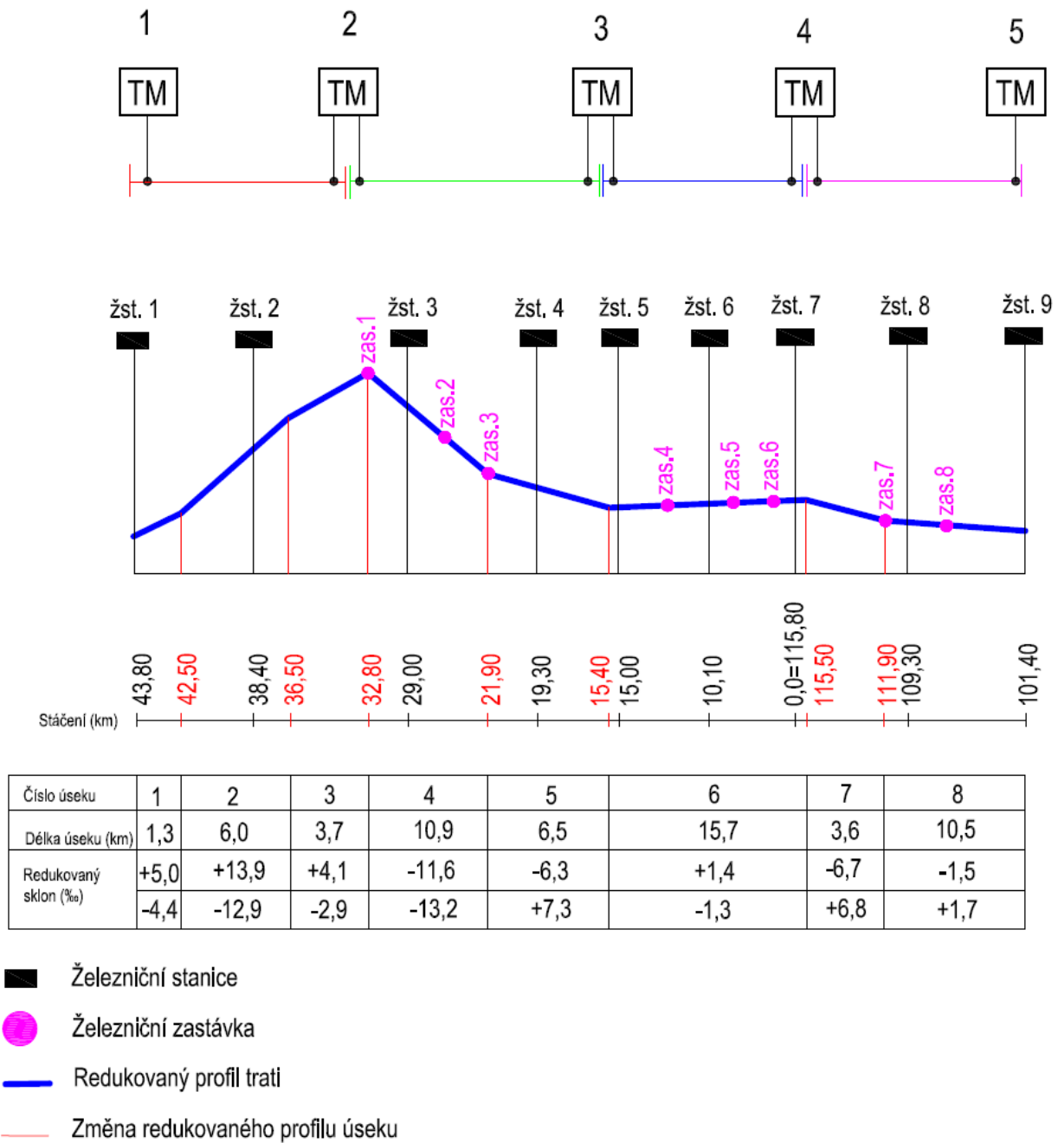
Tabulka 4 – Orientační výpočet úbytku napětí meziměřírenských úseků

Varianta	délka	ΔU_{max}	U	U_{min}
	km	V	V	V
TM 1 - TM 2	11,00	258,09	3000	2741,91
TM 2 - TM 3	17,80	417,64	3000	2582,36
TM 3 - TM 4	15,00	351,95	3000	2648,06
TM 4 - TM 5	14,40	337,87	3000	2662,13

Navrhnuté rozmístění trakčních měřičů vyhovuje normě EN 50163, minimální napětí trolejového vedení nekleslo pod 2,4 kV.

Dalším velice důležitým kritériem při návrhu umístění TM je připojitelnost TM do distribuční sítě a zaručení dostatečného rezervovaného příkonu. Z toho důvodu se musí zpracovat studie připojitelnosti. V našem případě ovšem řešíme navrhovanou soustavu jako imaginární ostrovní soustavu a nejsme těmito faktory limitováni.

Výsledný návrh uvažuje s dvoustranným napájením jednokolejné trati pomocí pěti trakčních měničů rozmístěným v řešeném úseku. Tento výstup implementuje do programu OpenPowerNet v kapitole 9.



Obrázek 28 – Výsledná návrh stejnosměrného napájení

9 OPENPOWERNET – STEJNOSMĚRNÉ NAPÁJENÍ

Celá simulace byla provedena v programu OpenTrack, kde je namodelována veškerá infrastruktura a dopravní technologie kromě napájení (koleje, výhybky, jízdní řád, zabezpečovací zařízení atd.) a v programu OpenPowerNet, kde bylo namodelováno napájení (vodiče, napájecí stanice, trakční propojení atd.)

V simulaci se uvažuje s typizovanými lokomotivami a elektrickými jednotkami. Pro vlaky kategorie EC se uvažuje s lokomotivou typu Vectron +R500t. U vlaků kategorie Os a Sp se uvažuje s elektrickou soupravou RegioPanter 640. Kromě vlaků kategorie Os a Sp se v modelu uvažuje s regulací výkonu dle TSI ENE a s povolenou rekuperací.

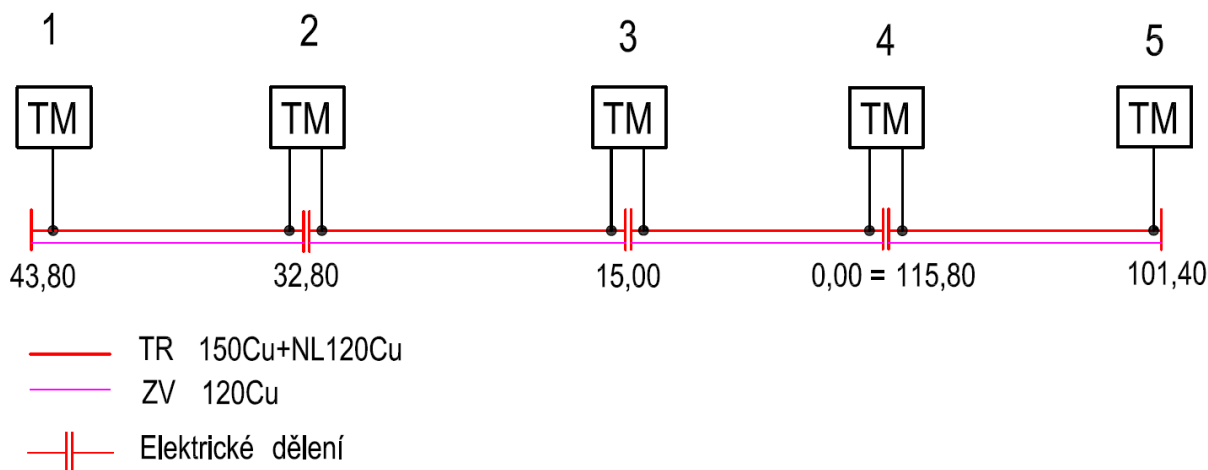
Sestava trakčního vedení (**TR 150Cu mm² + NL 120Cu mm² + ZV 120Cu mm²**) včetně základního propojení byla také převzata z návrhové varianty v kapitole 8.

Požadované výstupy:

- Minimální napětí v troleji
- Maximální napětí mezi kolejí a zemí
- Proudová zatížitelnost trakční sestavy
- Porovnání minimálního zkratového proudu s maximálním provozním proudem
- Střední užitečné napětí oblasti a vlaku
- Maximální čtvrt hodinový výkon dané TM

9.1 Vstupní data

Energetický model byl navržen v programu OpenPowerNet a zahrnuje v sobě model napájecích stanic, trakčního vedení a elektrických parametrů lokomotiv. Program OpenPowerNet využívá ke svému výpočtu program OpenTrack, ve kterém byla vymodelována infrastruktura kolejí, výhybek, nástupišť a zabezpečovacího zařízení. V programu OpenTrack byl také zpracován model vlaků, lokomotiv a elektrických souprav včetně jízdního řádu.



Obrázek 29 – Zapojení výsledného návrhu v programu OpenPowerNet

9.1.1 Parametry DC sítě

- Napětí 3 kV
- Frekvence 0 Hz

9.1.2 Parametry trakčních měření (TM)

- Výstupní napětí 3,3 kV
- Vnitřní odpor 0,044 Ω
- Úbytek napětí 0,005kV při 0,001 Ω
- TM 1 v km 44,80
- TM 2 v km 32,80
- TM 3 v km 15,00
Změna kilometráže km 0.00 = km 115,80
- TM 4 v km 115.80
- TM 5 v km 101,40

9.1.3 Parametry trakčního vedení

Všechny vodiče včetně kolejnic a země jsou v modelu definovány svými elektrickými a geometrickými vlastnostmi.

Vodiče

Nosné lano 120Cu

- geometrická poloha [x ; y] [0 ; 6,6] m
- ekvivalentní poloměr¹ 4,685 mm
- činný odpor při 20°C 0,150 Ω /km
- teplotní součinitel 0,004 $^{\circ}\text{C}^{-1}$
- uvažovaná teplota vodiče 80°C

Trolej 150Cu

- geometrická poloha [x ; y] [0 ; 5,6] m
- ekvivalentní poloměr 5,383 mm
- činný odpor při 20°C 0,122 Ω /km
- teplotní součinitel 0,00393 $^{\circ}\text{C}^{-1}$
- uvažovaná teplota vodiče 80°C

Zesilovací vedení 120Cu

- geometrická poloha [x ; y] [0 ; 6,6] m
- ekvivalentní poloměr 4,685 mm
- činný odpor při 20°C 0,150 Ω /km
- teplotní součinitel 0,004 $^{\circ}\text{C}^{-1}$
- uvažovaná teplota vodiče 80°C

Pravá kolejnice

- geometrická poloha [x ; y] [0,7175 ; 0] m
- ekvivalentní poloměr 38,54 mm

¹ Ekvivalentní poloměr je takový poloměr, který by měl kulovitý vodič o plném průřezu se stejnými elektrickými parametry.

- činný odpor při 20°C 0,416 Ω/km
- teplotní součinitel 0,004 °C⁻¹
- uvažovaná teplota vodiče 60°C

Levá kolejnice

- geometrická poloha [x ; y] [-0,7175 ; 0] m
- činný odpor při 20°C 0,416 Ω/km
- teplotní součinitel 0,004 °C⁻¹
- uvažovaná teplota vodiče 60°C

země

- geometrická poloha [x ; y] [0 ; -715]m
- ekvivalentní poloměr 465 m
- činný odpor 0,001 Ω/km

Propojky

- Vzdálenost mezikolejnicových propojení jedné stopy 300m
- Propojení zesilovacího vedení a troleje 100m
- Propojení troleje a nosného lana 1 000 S/km
- Propojení kolejnice a země² 0,01 S/km

9.1.4 Parametry hnacích vozidel

Výpočet potřebného výkonu pro jízdu vozidla počítá program OpenTrack pro uvedené typy vlaků:

EC

- Hmotnost bez lokomotivy 500t
- Jízdní odpor R
- Lokomotiva Vectron

Os,Sp

- RegioPanter 640
- Jízdní odpor R

Níže jsou uvedeny elektrické vlastnosti hnacích vozidel zadaných v programu OpenPowerNet.

Vectron

- Maximální výkon 6,4 MW
- Maximální tažná síla 300 kN
- Maximální dovolené napětí při rekuperaci 3,6 kV
- Účinnost 0,98
- Regulace výkonu dle TSI ENE ano

² Hodnota vychází z odborného odhadu na základě dané maximální svodové vodivosti 0,5 S/km (ČSN EN 50 122-2 ed.2) a na základě zjištění Ing. Jana Matouše publikovaného zde http://www.railvolution.net/czechraildays/2011/seminare/trendy_matous_a.pdf, kde uvádí přechodový odpor kolej – zem u nových tratí jako „mnohdy převyšující hodnotu 100 Ω/km (u nerekonstruovaných tratí tato hodnota obvykle bývá okolo 1 Ωkm)“.

640 RegioPanter

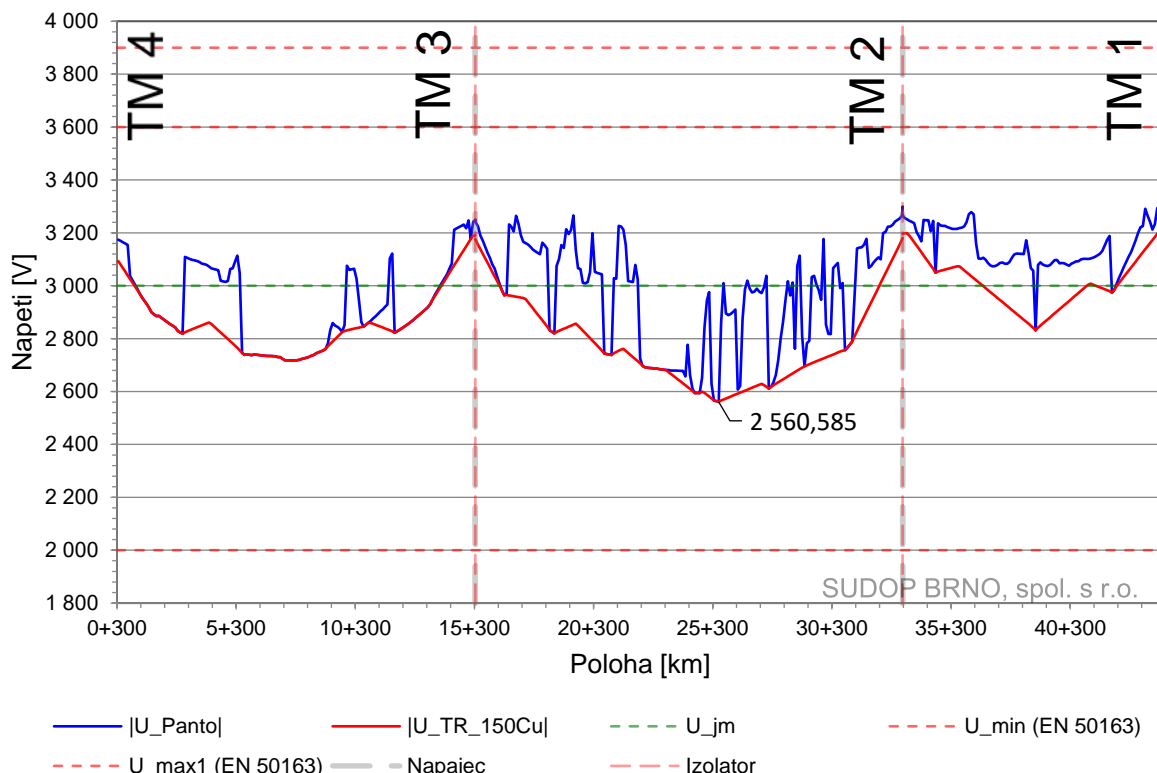
- Maximální výkon 2,04 MW
- Maximální tažná síla 196 kN
- Maximální dovolené napětí při rekuperaci 3,6 kV
- Účinnost 0,98
- Regulace výkonu dle TSI ENE ne

9.2 Výsledky simulace

Bylo provedeno několik simulací a výsledky prokázaly schopnost navrženého stejnosměrného trakčního vedení přenést potřebný výkon v rámci celé řešené oblasti.

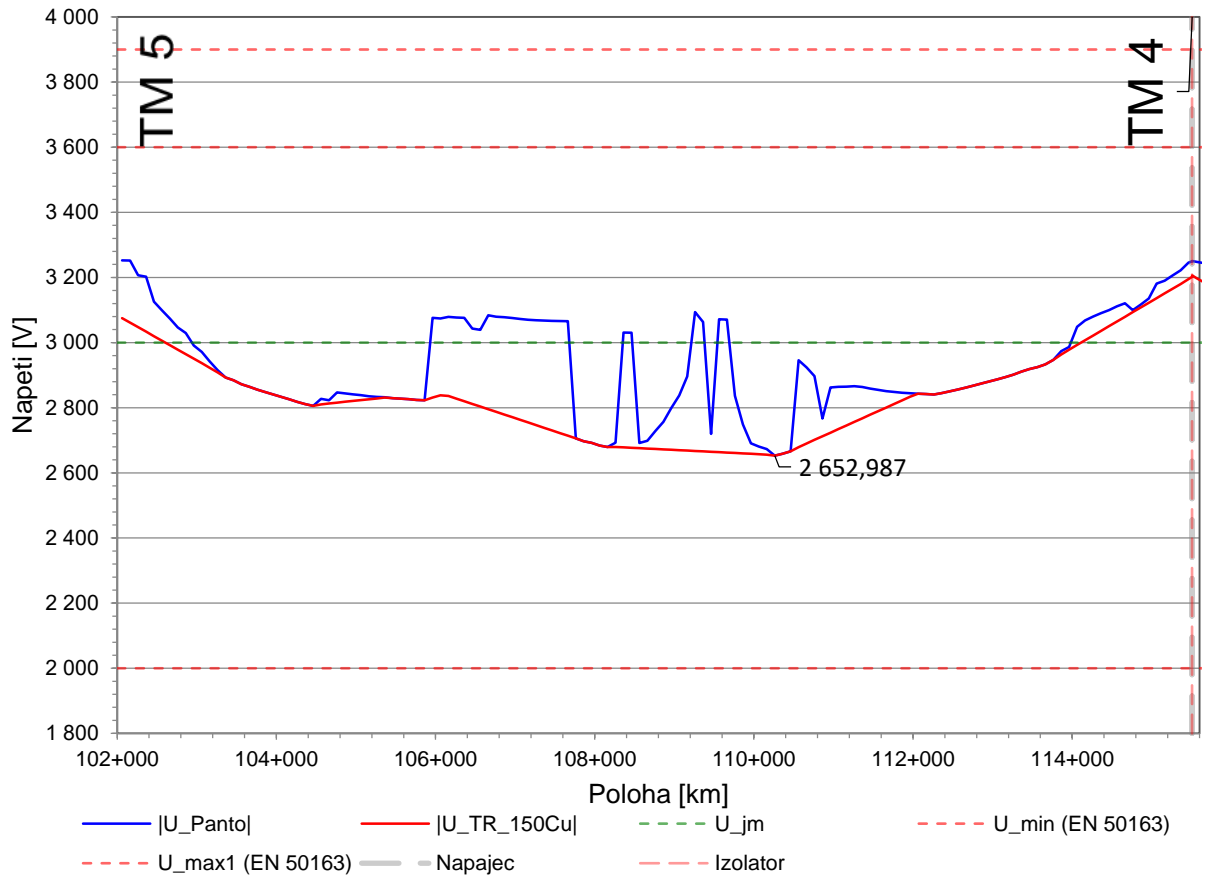
9.2.1 Minimální napětí v troleji

Minimální napětí v troleji je ze simulačního programu OpenPowerNet zobrazeno pomocí grafického průběhu závislosti napětí na poloze od trakční měřírny. Výstup je z důvodu změny značení polohy rozdělen na dva průběhy. V prvním průběhu (Graf 1) je zobrazeno minimální napětí v trolejovém vedení a minimální napětí na pantografovém sběrači lokomotivy pro simulovanou část úseku od TM 1 po TM 4, na druhém průběhu (Graf 2) pro úsek od TM 4 po TM 5. Cílem navrženého napájení je splnění normy ČSN EN 50 388 ed.2, tedy napětí nesmí klesnout pod 2,4 kV v celém řešeném úseku.



Graf 1 – Průběh minimálního napětí na troleji a pantografu v úseku TM 1 – TM 4

Minimální napětí trolejového vedení ani minimální napětí na pantografovém sběrači soupravy nekleslo v řešené oblasti TM 1 až TM 4 pod 2 560 V, splňuje tedy normu ČSN EN 50 388 ed.2 a vyhovělo.



Graf 2 - Průběh minimálního napětí na troleji a pantografu v úseku TM 4 – TM 5

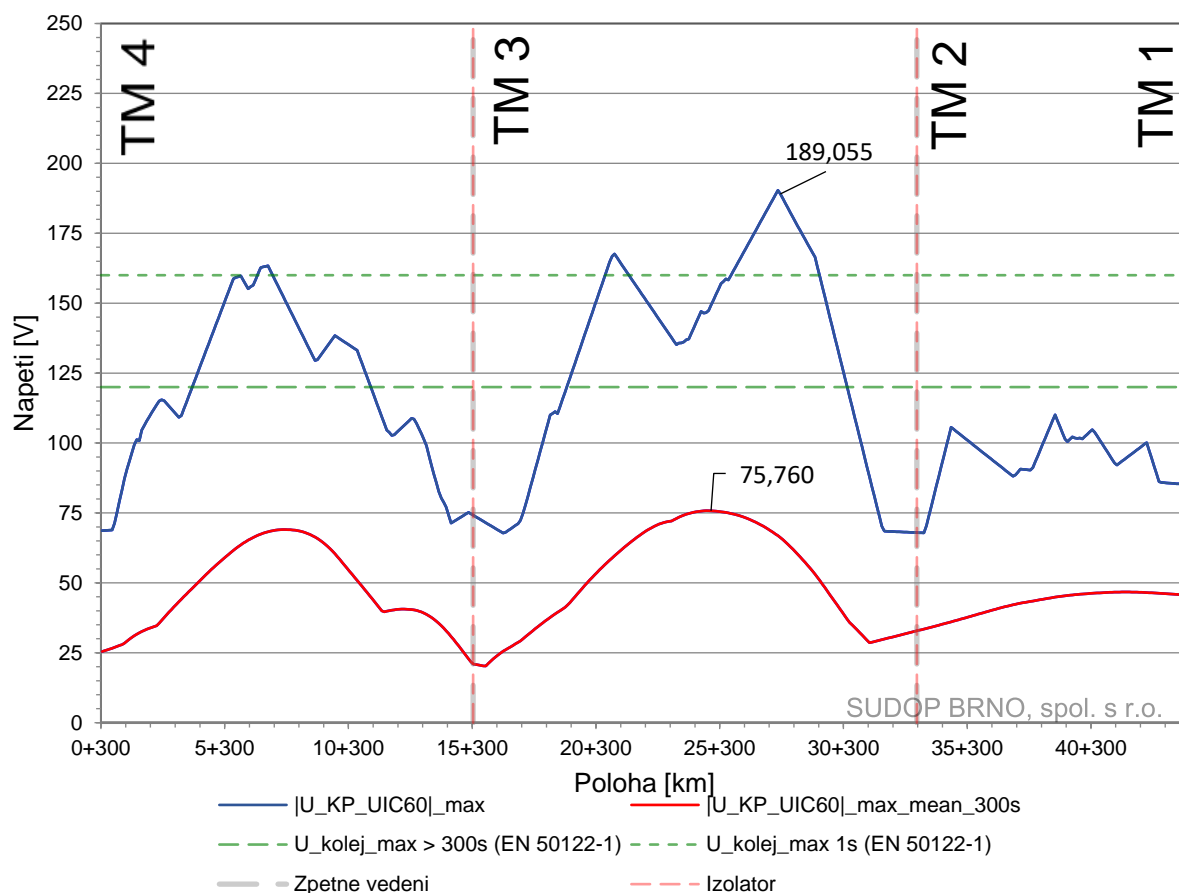
Minimální napětí trolejového vedení ani minimální napětí na pantografovém sběrači souprav nekleslo v řešené oblasti TM 4 až TM 5 pod 2 652 V, splňuje tedy normu ČSN EN 50 388 ed.2 a vyhovělo.

Z průběhů zřetelně vyplývá vliv topografického profilu tratě na nutnosti využití vyššího výkonu elektrických lokomotiv a způsobení vyššího úbytku napětí na trolejovém vedení při strmém stoupání, jak je zobrazeno v grafu č. 2 v úseku TM 2 - TM 3.

9.2.2 Maximální napětí mezi kolejí a zemí (dotykové napětí)

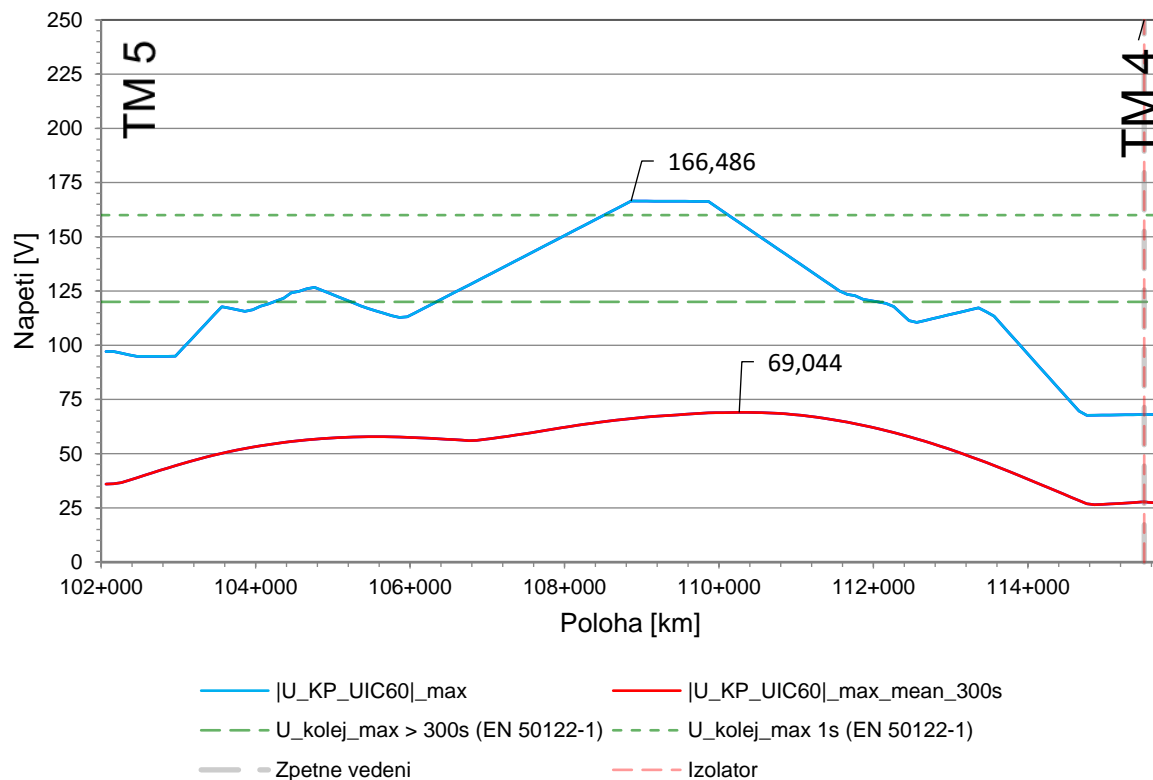
Hlavní příčinou vzniku dotykových napětí při provozních a poruchových stavech je místní a časová závislost potenciálu kolejnice. Hodnoty dovolených dotykových napětí jsou rozděleny dle normy ČSN EN 50122-1 ed.2 na dlouhodobé provozní a krátkodobé provozní hodnoty. Dlouhodobé rozumíme trvající déle než 300s a krátkodobé do 1s. Pro stejnosměrnou napájecí soustavu 3kV je dlouhodobé maximum dotykového napětí 120 V a krátkodobé maximum dotykového napětí 160 V.

Grafické průběhy zde byly opět rozděleny na dvě části. Graf 3 zobrazuje průběh napětí mezi kolejí a zemí v řešeném úseku mezi TM 1 a TM 4, graf 4 pro úsek TM 4 až TM 5.



Graf 3 – Dotykové napětí v úseku TM 1 – TM 4

Z grafu 3 bylo zjištěno maximální dlouhodobé dotykové napětí 75,76 V v úseku TM 2 - TM 3, podmínky normy maximálního dlouhodobého provozního napětí 120 V tedy byly splněny pro oba simulované úseky. Ovšem krátkodobé provozní dotykové napětí dosáhlo v úseku TM 2 – TM 3 až 189 V, tedy nevyhovující. Mírné překročení krátkodobého maxima dotykového napětí bylo také překročeno v meziměřírenském úseku TM 3 – TM 4 a taktéž v úseku TM 4 – TM 5, který je zobrazen v grafu 4.



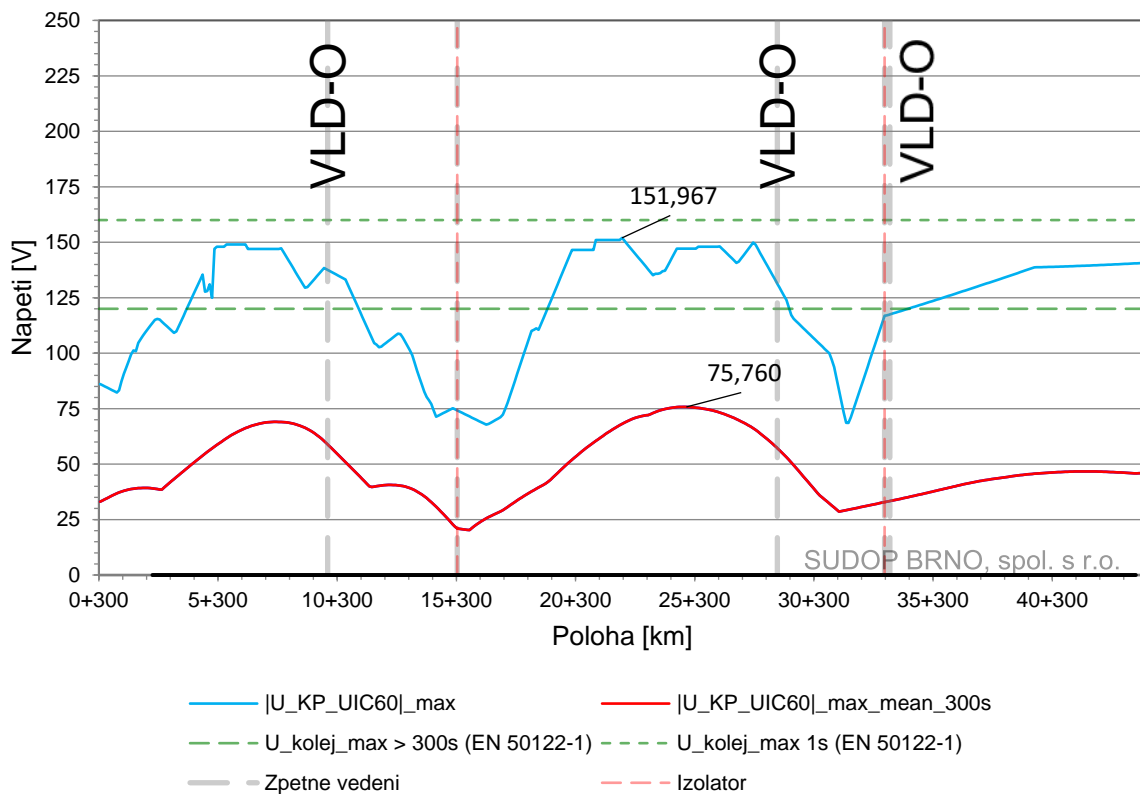
Graf 4 - Dotykové napětí v úseku TM 4 – TM 5

Z důvodu překročení maximálního krátkodobého dotykového napětí v řešeném problému bylo do návrhu přidáno zařízení VLD-O.

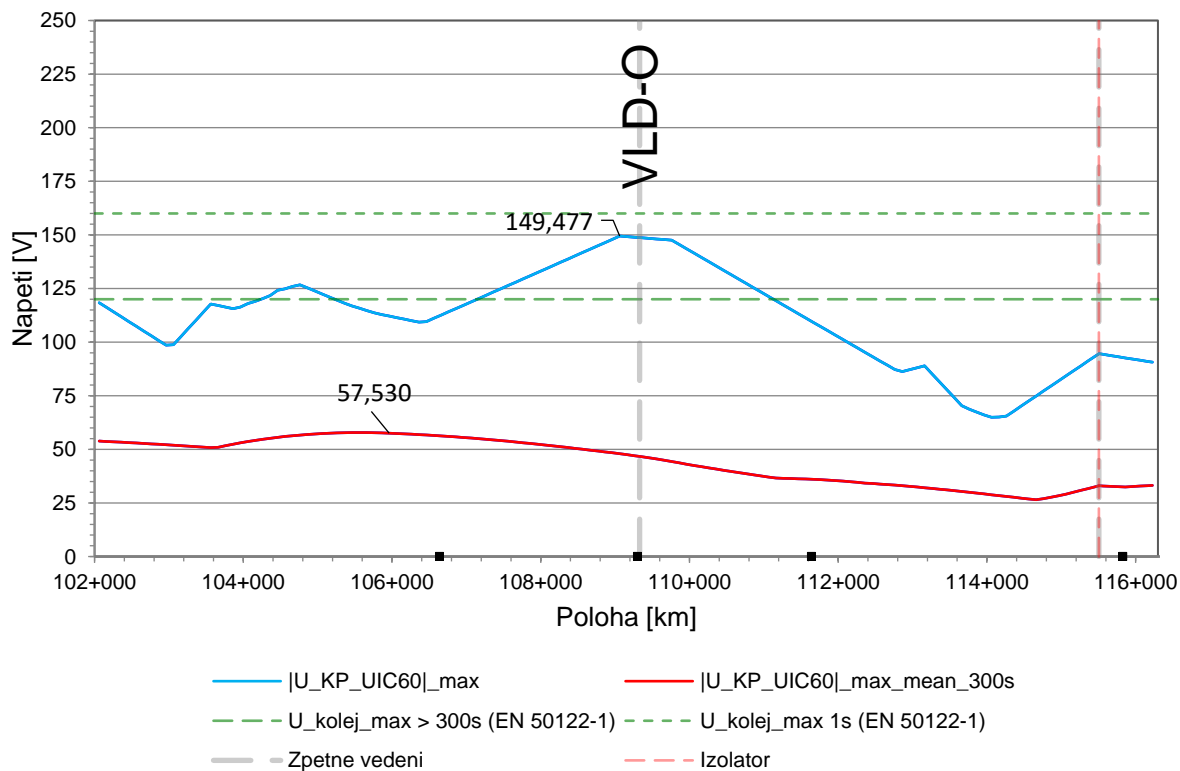
Zařízení VLD-O omezuje nedovolené vysoké dotykové napětí na neživých kovových částech železničních zařízení ve střídavých i stejnosměrných trakčních soustavách, vytváří přechodné nebo trvalé spojení zpětného obvodu s uzemněním trakční soustavy po dobu, kdy je překročena přípustná hodnota dotykového napětí, vyrovnává rozdílový potenciál mezi zpětným obvodem a uzemněním okolních elektrických a elektronických zařízení a zabraňuje jejich poškození, omezuje dotykové napětí a chrání tak osoby, které se mohou dostat s těmito částmi do kontaktu, eliminuje vysoké impulzní přepětí indukované do trakčního vedení nebo zařízení pro železniční dopravu úderem blesku. **Jmenovité spouštěcí napětí zařízení VLD-O je 120 V.**

Zařízení VLD-O vyžaduje připojení do jednofázové AC sítě s napětím 230 V 50 Hz, proto bylo nutné zařízení umístit do nejbližších železničních stanic a zastávek problematických úseků. **Celkově byly navrženy 4 zařízení a to v železniční stanici 3 a železničních zastávkách 1,4 a 8.** Poté byla provedena další simulace.

Graf 5 a 6 nám zobrazuje nové hodnoty dotykových napětí po využití zařízení VLD-O a jeho zapůsobení, krátkodobé ani dlouhodobé maximální dotykové napětí nepřekročí normou stanovenou hranici v celé řešené oblasti, návrh tedy splňuje normu ČSN EN 50122-1 ed.2.



Graf 5- Dotykové napětí v úseku TM 1 – TM 4 po implementaci VLD-O



Graf 6 - Dotykové napětí v úseku TM 4 – TM 5 po implementaci VLD-O

9.2.3 Proudová zatížitelnost TV a zkratové poměry

Dovolená proudová zatížitelnost vodičů používaných na trakčním vedení drah je řešena dle normy ČSN 34 1530 ed.2, která nám udává parametry daných vodičů.

Pro trolejový měděný vodič o průřezu 150 mm² udává:

- nejmenší vodivost při +20 °C 8,1967 S.km⁻¹,
- největší dovolený odpor při +20 °C 0,122 Ω.km⁻¹,
- trvalé dovolené zatížení 780 A,

pro měděná lana o průřezu 120 mm²:

- nejmenší vodivost při +20 °C 6,666 S.km⁻¹,
- největší dovolený odpor při +20 °C 0,150 Ω.km⁻¹,
- trvalé dovolené zatížení 675 A.

Pro DC trakční sestavu **TR 150Cu + NL 120Cu + ZV 120Cu** lze celkové dovolené zatížení určit takto:

Zjistí se úbytek napětí ΔU na 1 km vedení pro vodič největší vodivosti při jeho přípustném zatížení, což je:

$$\Delta U = 780 \cdot 0,122 = 95,16 \text{ V}$$

Dále se stanoví proud pro druhý vodič pomocí vztahu:

$$\Delta U \cdot \text{vodivost lana } 120 \text{ mm}^2 \text{ Cu} = 95,16 \cdot 6,666 = 634 \text{ A}$$

a porovná se s přípustným zatížením, které je 675 A.

Vypočtený proud vyhovuje a celkové přípustné zatížení pro tuto sestavu je:

$$780 \text{ A} + 634 \text{ A} + 634 \text{ A} = \mathbf{2048 \text{ A.}}$$

V příloze 1 – 5 nalezneme průběhy proudového zatížení jednotlivých napáječů v trakčních měnících. Jednotlivé hodnoty proudu ze všech TM jsou vypsány v následující tabulce 5, hodnoty proudu jsou odečteny z jednotlivých průběhů pro oteplovací časovou konstantu trakčního vedení 300 s. Tabulka obsahuje proudové zatížení trolejového drátu s nosným lanem a zesilovacího vedení v jednotlivých směrech od trakčních měnících. Součet těchto proudů je porovnán s přípustným zatížením sestavy a vyhodnocen.

Tabulka 5 – Proudové zatížení jednotlivých napáječů TM

Označení	I_{TR+NL_300s}	I_{ZV_300s}	I_{celk_300s}	Vyhovuje/ Nevyhovuje
	A	A	A	
TM 1 => TM 2	316	277	593	VYHOVUJE
TM 2 => TM 1	213	154	367	VYHOVUJE
TM 2 => TM 3	391	334	725	VYHOVUJE
TM 3 => TM 2	442	377	819	VYHOVUJE
TM 3 => TM 4	467	333	800	VYHOVUJE
TM 4 => TM 3	434	335	769	VYHOVUJE
TM 4 => TM 5	497	388	885	VYHOVUJE
TM 5 => TM 4	450	413	863	VYHOVUJE

Minimální zkrat byl spočítán podle předpisu SŽDC (ČSD) SR 34 (E) pro nejbližší místo (styk soustav nebo konec trati) a porovnán s maximálním proudem v napáječi ze simulace.

V následující tabulce 6 jsou zobrazeny špičkové hodnoty proudu pro jednotlivé napaječe každé trakční měřírny z přílohy 1 - 5. Veličina L nám udává vzdálenost mezi jednotlivými TM, která je důležitá pro výpočet minimálního zkratového proudu. Maximální provozní proud $I_{celk_1s} = I_{max}$ je součet špičkového proudu trolejového vedení s nosným lanem a zesilovacím vedením.

Příklad výpočtu minimálního zkratového proudu pro TM 1 => TM 2, viz kapitola 4.3 :

$$I_{Z,MIN} = \frac{U_{o\ min}}{R_{Z\ max}} \quad [A; V; ohm] \quad (9.1)$$

(9.2)

$$R_{Z\ max} = (R_{VO} + R_{KO}) * L$$

(9.3)

$$R_{Z\ max} = (0,040 + 0,004) * 11 = 0,484 \ \Omega$$

$$I_{Z,MIN} = \frac{2\ 700}{0,484} = 5579 \ A \quad (9.4)$$

$$\frac{I_{z,min}}{1,3} > I_{nastav} > 1,2 I_{max} \quad (9.5)$$

Jednotlivé minimální zkratové a maximální provozní proudy tedy musí splnit podmínku :

$$4291 \ A > I_{nastav} > 1630 \quad (9.6)$$

Tabulka 6 – Porovnání zkratových poměrů

Označení	L	I_{TR+NL_1s}	I_{ZV_1s}	I_{celk_1s}	$I_{z,min}$	$I_{celk_1s} * 1,2$	$I_{z,min} / 1,3$	Vyhovuje/ Nevyhovuje
	km	A	A	A	A	A	A	
TM 1 => TM 2	11,0	724	634	1358	5579	1630	4291	VYHOVUJE
TM 2 => TM 1		857	618	1475	5579	1770	4291	VYHOVUJE
TM 2 => TM 3	17,8	1159	984	2143	3447	2572	2652	VYHOVUJE
TM 3 => TM 2		1084	924	2008	3447	2410	2652	VYHOVUJE
TM 3 => TM 4	15,0	998	717	1715	4091	2058	3147	VYHOVUJE
TM 4 => TM 3		944	729	1673	4091	2008	3147	VYHOVUJE
TM 4 => TM 5	14,4	944	749	1693	4261	2032	3278	VYHOVUJE
TM 5 => TM 4		846	775	1621	4261	1945	3278	VYHOVUJE

Z uvedených výsledků vyplývá, že existuje dostatečný prostor pro nastavení nadproudových ochran

9.2.4 Výkonové zatížení TM

Podrobné průběhy výkonového zatížení jednotlivých trakčních měření nalezneme v přílohách 6 - 15. V tabulce 7 jsou vypsány špičkové a patnácti minutové výkony jednotlivých TM a byly využity pro dimenzování TM. Maximální čtvrt hodinový výkon nastal na TM 4 a to 2,06 MW. Z důvodu dodržení kritéria napájení N-1 byly navrženy do každé TM dvě standartní usměrňovací jednotky o výkonu jedné jednotky 5,3 MVA. V praxi při bezporuchovém provozu jsou v provozu obě jednotky, ale v případě poruchy na jedné usměrňovací jednotce je schopna druhá dodat dostatečný výkon, aby nebyla narušena stabilita jízdního řádu.

Tabulka 7 - Výkonové zatížení TM

Označení	P_{1s}	P_{15min}	Počet usměrňovačů	Výkon usměrňovače
	<i>MW</i>	<i>MW</i>	<i>ks</i>	<i>MVA</i>
TM 1	4,394	1,142	1+1	5,3
TM 2	6,378	1,715	1+1	5,3
TM 3	6,660	2,060	1+1	5,3
TM 4	5,244	2,351	1+1	5,3
TM 5	5,228	1,819	1+1	5,3

9.2.5 Střední užitečné napětí oblasti a vlaku

Střední užitečné napětí se vypočítá počítačovou simulací dané geografické oblasti, se zřetelem na všechny vlaky, které mají projet touto oblastí v daném časovém intervalu odpovídajícím podle jízdního řádu době špičkového provozu. Tento časový interval musí být vhodně stanoven, aby v dané geografické oblasti bylo vzato v úvahu nejvyšší zatížení každého elektrického úseku, v našem případě tedy 6 – 8 h.

Při simulaci je nutné vzít v úvahu elektrické charakteristiky infrastruktury a každý odlišný typ vlaku. Základní napětí na sběrači každého vlaku v dané geografické oblasti je analyzováno v každém časovém kroku simulace. U střídavých soustav se používají efektivní hodnoty základního napětí. U stejnosměrných soustav se používá střední hodnota napětí. Tento časový krok musí být při simulaci dostatečně krátký, aby byl vzat zřetel na všechny události v jízdním řádu.

Minimální hodnoty pro střední užitečné napětí na sběrači za normálních pracovních podmínek pro jmenovité napětí 3 kV je **2,7 kV**.

Střední užitečné napětí vlaku

Představuje střední hodnotu všech napětí v téže simulaci, jako je studie dané geografické oblasti, avšak analyzují se pouze napětí pro určitý vlak v každém časovém kroku, kdy vlak odebrá trakční zatížení (neberou se v úvahu kroky, kdy vlak stojí, při rekuperaci nebo při jízdě výběhem).

Střední hodnota těchto napětí je kontrolou výkonnosti každého vlaku v simulaci a jako výsledek této kontroly je určen dimenzovaný vlak, tedy vlak, jehož schopnost akcelerace je slabým napětím nejvíce omezena, viz tabulka 8.

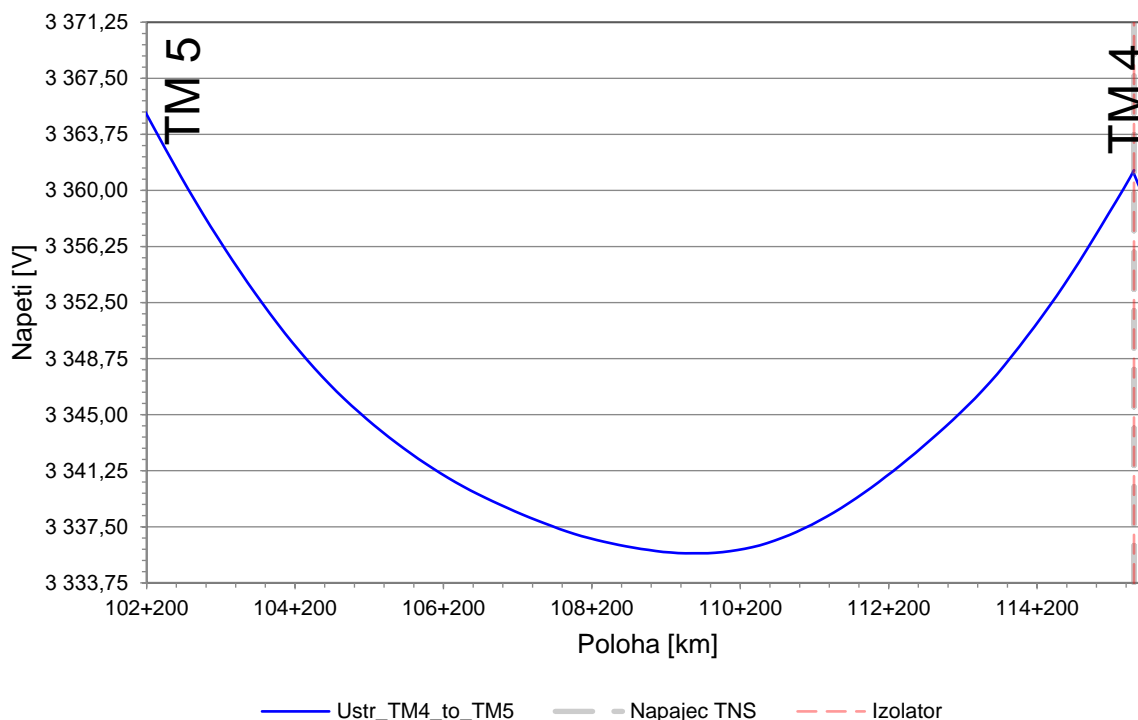
Tabulka 8 – Střední užitečné napětí vlaku

spoj	formace	lokomotivy	$U_{stř}$ V
celkem		11	3 319
<i>Maximum</i>		1	3 275
<i>Minimum</i>		1	3 057
EC 200	EC	1	3 275
EC 202	EC	1	3 057
EC 301	EC	1	3 108
EC 303	EC	1	3 148
Os 2000	Os	1	3 183
Os 2002	Os	1	3 140
Os 2004	Os	1	3 153
Os 2006	Os	1	3 150
Sp 1802	Os	1	3 245
Sp 1804	Os	1	3 231
Sp 1806	Os	1	3 228

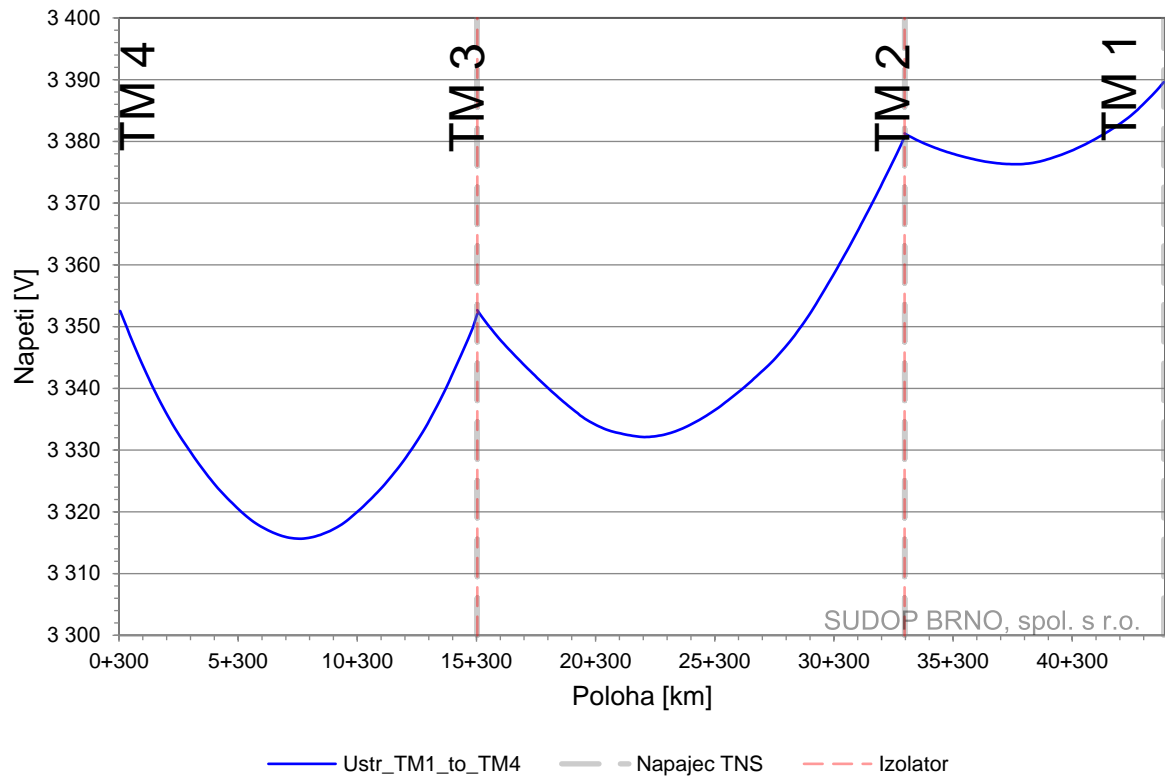
Z výsledků je patrné, že minimální napětí vlaku v tabulce 8 nekleslo pod 2,7 kV, tedy vyhovuje.

Střední užitečné napětí oblasti

Představuje střední hodnotu všech napětí analyzovaných v simulaci a indikuje jakost napájení pro celou oblast. Do této analýzy jsou v každém časovém kroku simulace v dané geografické oblasti zahrnuty všechny vlaky v uvažované době špičkového provozu, ať jsou v trakčním režimu nebo nikoliv (tedy ve stavu klidu, při trakci, rekuperaci). Z grafů 7 a 8 je zřejmý vyhovující stav navrženého trakčního napájení, napětí v oblasti nikde nekleslo pod hranici 2,7 kV.



Graf 7 – Průběh středního užitečného napětí oblasti v meziměřínskému úseku TM 4 - TM 5



Graf 8 - Průběh středního užitečného napětí oblasti v meziměřírenském úseku TM 1 – TM 5

10 NÁVRH NAPÁJENÍ STŘÍDAVOU PROUDOVOU SOUSTAVOU 25 kV 50Hz

Stejně jako u návrhu stejnosměrného napájení nám jako prvotní podklad pro návrh umístění trakční transformovny (dále jen TT) poslouží norma ČSN EN 50388 ed.2 Tabulka D. 1, která nám udává minimální a maximální vzdálenost jednostranně napájeného úseku pro napěťovou hladinu 25 kV. Norma tedy udává minimální vzdálenost 15 km a maximální délku napájeného úseku 30 km. Celková délka řešené tratě je 58 km, nabízí se nám tedy umístění jedné TT do poloviny řešeného úseku a to do **žst. 5, žkm 15,00**.

TT tedy bude napájet dva jednostranně napájené železniční úseky, první z žst.1 až žst. 5 o celkové délce 28,8 km a žst.5 až žst 9 o celkové délce 29,4 km.

Pro orientační kontrolu rozmístění trakčních měření provedeme výpočet maximálního úbytku napětí kratšího úseku avšak více dopravně zatíženého a topograficky náročnějšího, v tomto případě tedy z žst. 1 do žst. 5. K tomuto výpočtu je nutné znát navrhnutou trakční sestavu, činný odpor zpětné cesty (kolej) a činný odpor zvolené trakční sestavy, tedy trolejového vedení a nosného lana.

Pro výpočet byla zvolena trakční trolejová sestava „J“, pro střídavou trakční soustavu 25 kV 50 Hz **TR 100Cu mm² + NL 50Bz mm²**, která se skládá z trolejového měděného drátu o průměru vodiče 100 mm² a bronzového nosného lana o průměru vodiče 50 mm².

Parametry trakční sestavy „J“ :

Impedance sestavy „J“ $0,26 + j 0,45 \quad \Omega/km$

Impedance trakční sestavy „J“ je uvažován z Předpisu SŽDC (ČSD) SR 34(E) s úpravou dle dopisu zn.: 21480/2017-SŽDC-O14.

Parametry elektrických jednotek:

EC - Vectron

- Maximální výkon 6,4 MW
- Maximální tažná síla 300 kN
- Max. napětí při rekuperaci 29 kV
- Skutečný účinník 0,98
- Regulace výkonu dle TSI ENE ano

640 RegioPanter

- Maximální výkon 2,04 MW
- Maximální tažná síla 196 kN
- Max. napětí při rekuperaci 29 kV
- Skutečný účinník 0,98
- Regulace výkonu dle TSI ENE ne

Při orientačním výpočtu maximálního úbytku napětí v jednostranně napájeném úseku uvažujeme jako spotřebič elektrickou jednotku Vectron (vlak typu EC) a 640 RegioPanter (vlaky typu Os a Sp). Je nutné zvolit nejnepríznivější dobu provozu na trati, v našem případě se nejnáročnější podmínky na napájecí soustavu budou považovat v čase 07:39 h (viz GVD)). V tomto okamžiku uvažujeme maximální výkon vlaku typu EC při stoupání v žkm 42,50 a maximální výkon vlaku typu Sp, který se nachází také ve stoupání z žst.4 do železniční zastávky 3 v žkm 21,00.

Nyní tedy postupujeme dle výpočtu jednostranného napájení jednokolejné s více odběry trati z kapitoly 5.1, napětí na troleji nesmí klesnout pod 22,5 kV, tedy maximální úbytek nesmí překročit 4,5 kV dle normy EN 50163.

Výpočet byl proveden pro úsek žst. 1 až žst. 5 o celkové délce 28,8 km a maximálním stoupáním až 13,9 ‰ (neuvažuje se rekuperace vozidel):

$$\Delta U_{max} \geq \sum_{k=1}^n I_k * R_k * \cos\varphi_k + \sum_{k=1}^n I_k * X_k * \sin\varphi_k \quad (10.1)$$

$$\Delta U_{max} = 4\,500\,V$$

kde	I_k	proud odebíraný k-tým vozidlem
	R_k	činný odpor vedení od TT až k místu k-tého odběru
	X_k	reaktance vedení od TT až k místu k-tého odběru
	$\cos\varphi_k$	účiník k-tého vozidla

Maximální proud odebíraný vlakem typu EC s elektrickou jednotkou Vectron

$$I_{EC} = \frac{P_{EC}}{U_{stř}} = \frac{6,4\,MW}{23\,kV} = 278,26\,A \quad (10.2)$$

Maximální proud odebíraný vlakem typu Sp s elektrickou jednotkou 640 RegioPanter

$$I_{Sp} = \frac{P_{Sp}}{U_{stř}} = \frac{2,04\,MW}{23\,kV} = 88,69\,A \quad (10.3)$$

Činný odpor vedení od TT k pozici odběru EC

$$R_{EC} = R * L_{EC} = 0,26 * 27,5 = 7,15\,\Omega \quad (10.4)$$

Činný odpor vedení od TT k pozici odběru Sp

$$R_{Sp} = R * L_{Sp} = 0,26 * 6 = 1,56\,\Omega \quad (10.5)$$

Reaktance vedení od TT k pozici odběru EC

(10.6)

$$X_{EC} = X * L_{EC} = 0,45 * 27,5 = 12,375 \Omega$$

Reaktance vedení od TT k pozici odběru Sp

(10.7)

$$X_{Sp} = X * L_{Sp} = 0,45 * 6 = 2,7 \Omega$$

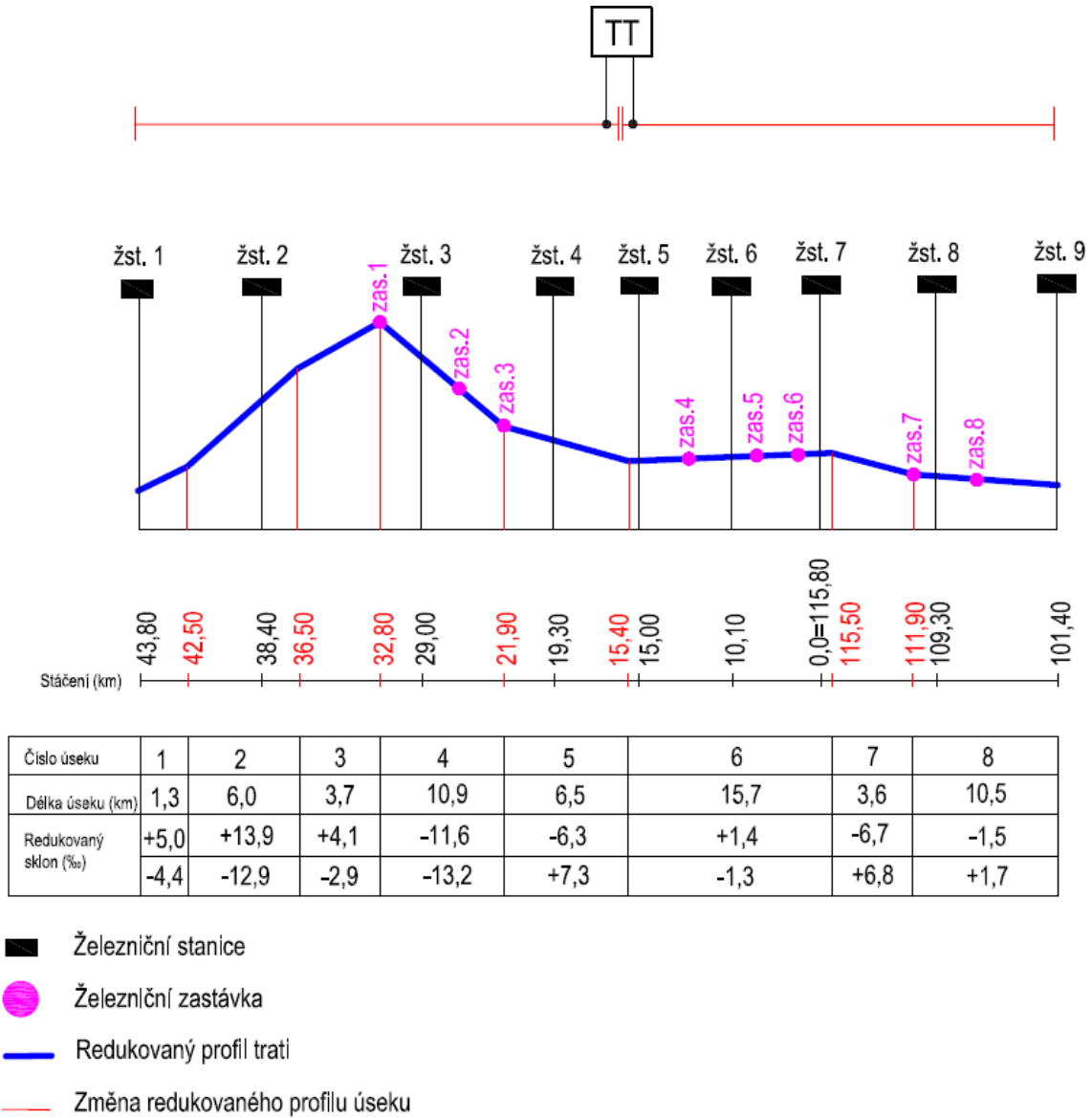
$$\Delta U_{max} = I_{EC} * R_{EC} * \cos\varphi_{EC} + I_{Sp} * R_{Sp} * \cos\varphi_{Sp} + I_{EC} * X_{EC} * \sin\varphi_{EC} + I_{Sp} * X_{Sp} * \sin\varphi_{Sp} \quad (10.8)$$

$$\Delta U_{max} = 278,26 * 7,15 * 0,98 + 88,69 * 1,56 * 0,98 + 278,26 * 12,375 * 0,198 + 88,69 * 2,7 * 0,198 \quad (10.9)$$

$$\Delta U_{max} \geq 2\,814,5\text{ V}$$

Maximální úbytek napětí nepřesáhl 4 500 V, navrhnuté rozmístění TT splňuje požadavky normy EN 50163.

Výsledný návrh uvažuje s jednostranným napájením jednokolejné trati pomocí jedné trakčních transformovny umístěné v žst. 5. Tento výstup implementuje do programu OpenPowerNet v kapitole 11.



Obrázek 30 – Výsledná návrh střídavého napájení

11 OPENPOWERNET –STŘÍDAVÉ NAPÁJENÍ

Celá simulace byla provedena v programu OpenTrack, kde je namodelována veškerá infrastruktura a dopravní technologie kromě napájení (koleje, výhybky, jízdní řád, zabezpečovací zařízení atd.) a v programu OpenPowerNet, kde bylo namodelováno napájení (vodiče, napájecí stanice, trakční propojení atd.)

V simulaci se uvažuje s typizovanými lokomotivami a elektrickými jednotkami. Pro vlaky kategorie EC se uvažuje s lokomotivou typu Vectron +R500t. U vlaků kategorie Os a Sp se uvažuje s elektrickou soupravou RegioPanter 640. Kromě vlaků kategorie Os a Sp se v modelu uvažuje s regulací výkonu dle TSI ENE a s povolenou rekuperací.

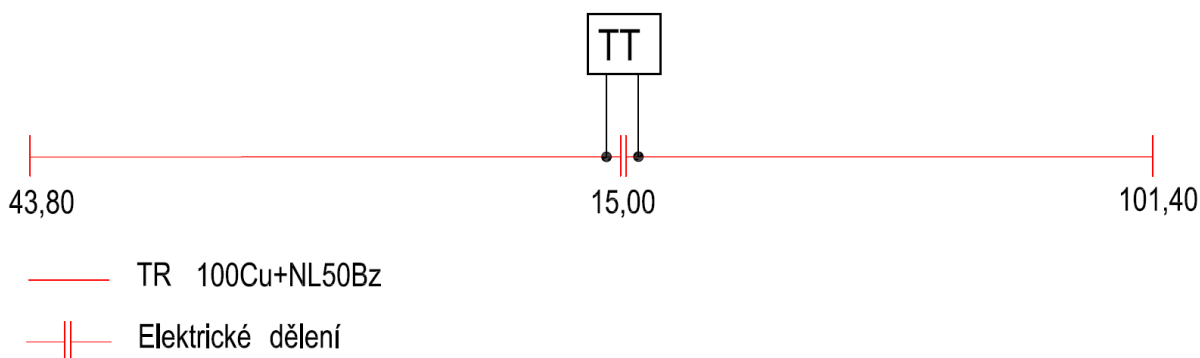
Sestava trakčního vedení (**TR 100Cu mm² + NL 50Bz mm²**) včetně základního propojení byla také převzata z návrhové varianty v kapitole 10.

Požadované výstupy:

- Minimální napětí v troleji
- Maximální napětí mezi kolejí a zemí
- Proudová zatížitelnost trakční sestavy
- Porovnání minimálního zkratového proudu s maximálním provozním proudem
- Střední užitečné napětí oblasti a vlaku
- Maximální čtvrt hodinový výkon TT

11.1 Vstupní data

Energetický model byl navržen v programu OpenPowerNet a zahrnuje v sobě model napájecích stanic, trakčního vedení a elektrických parametrů lokomotiv. Program OpenPowerNet využívá ke svému výpočtu program OpenTrack, ve kterém byla vymodelována infrastruktura kolejí, výhybek, nástupišť a zabezpečovacího zařízení. V programu OpenTrack byl také zpracován model vlaků, lokomotiv a elektrických souprav včetně jízdního řádu.



Obrázek 31 – Zapojení střídavého modelu v programu OpenPowerNet

11.1.1 Parametry AC sítě

- Napětí 25 kV
- Frekvence 50 Hz

11.1.2 Parametry trakční transformovny (TT)

- Napětí nakrátko 16 %
- Ztráty nakrátko 96 kW
- Ztráty naprázdno 7,5 kW
- Proud naprázdno 0,1 A
- Jmenovitý výkon 16 MVA
- Primární napětí 115 kV
- Sekundární napětí 27 kV
- TT v žkm 15,00
- Rekuperace TNS umožňuje přetok energie zpět do sítě

11.1.3 Parametry trakčního vedení

Všechny vodiče včetně kolejnic a země jsou v modelu definovány svými elektrickými a geometrickými vlastnostmi.

Vodiče

Nosné lano 50Bz

- geometrická poloha [x ; y] [0 ; 6,6] m
- ekvivalentní poloměr³ 3,578 mm
- činný odpor 0,32 Ω/km
- teplotní součinitel 0,004 °C⁻¹
- uvažovaná teplota vodiče 80°C

Trolej 100Cu

- geometrická poloha [x ; y] [0 ; 5,6] m
- ekvivalentní poloměr 4,395 mm
- činný odpor 0,183 Ω/km
- teplotní součinitel 0,00393 °C⁻¹
- uvažovaná teplota vodiče 80°C

Pravá kolejnice

- geometrická poloha [x ; y] [0,7175 ; 0] m
- ekvivalentní poloměr 38,54 mm
- činný odpor⁴ při 20°C 0,416 Ω/km
- teplotní součinitel 0,004 °C⁻¹
- uvažovaná teplota vodiče 60°C

³ Ekvivalentní poloměr je takový poloměr, který by měl kulovitý vodič o plném průřezu se stejnými elektrickými parametry.

⁴ Odpor kolejnice vychází ze změřených hodnot uvedených v dopise zn. 21480/2017-SŽDC-014 pro tvar kolejnice UIC 60.

Levá kolejnice

- geometrická poloha [x ; y] [-0,7175 ; 0] m
- činný odpor při 20°C 0,416 Ω/km
- teplotní součinitel 0,004 °C⁻¹
- uvažovaná teplota vodiče 60°C

Osová vzdálenost dvou kolejí 4 m

země

- geometrická poloha [x ; y] [0 ; -715]m
- ekvivalentní poloměr 465 m
- činný odpor 0,0393 Ω/km

Propojky

- Vzdálenost mezikolejnicových propojení jedné stopy 1 km
- Propojení troleje a nosného lana 1 000 S/km
- Propojení kolejnice a země 0,01 S/km

11.1.4 Parametry hnacích vozidel

Výpočet potřebného výkonu pro jízdu vozidla počítá program OpenTrack pro uvedené typy vlaků:

EC

- Hmotnost bez lokomotivy 500t
- Jízdní odpor R
- Lokomotiva Vectron

Os

- Jízdní odpor R
- Lokomotiva RegioPanter 640

Sp

- Jízdní odpor R
- Lokomotiva RegioPanter 640

Níže jsou uvedeny elektrické vlastnosti hnacích vozidel zadaných v programu OpenPowerNet.

Vectron

- Maximální výkon 6,4 MW
- Maximální tažná síla 300 kN
- Max. napětí při rekuperaci 29 kV
- Skutečný účinník 0,98
- Regulace výkonu dle TSI ENE ano

640 RegioPanter

- Maximální výkon 2,04 MW
- Maximální tažná síla 196 kN
- Max. napětí při rekuperaci 29 kV

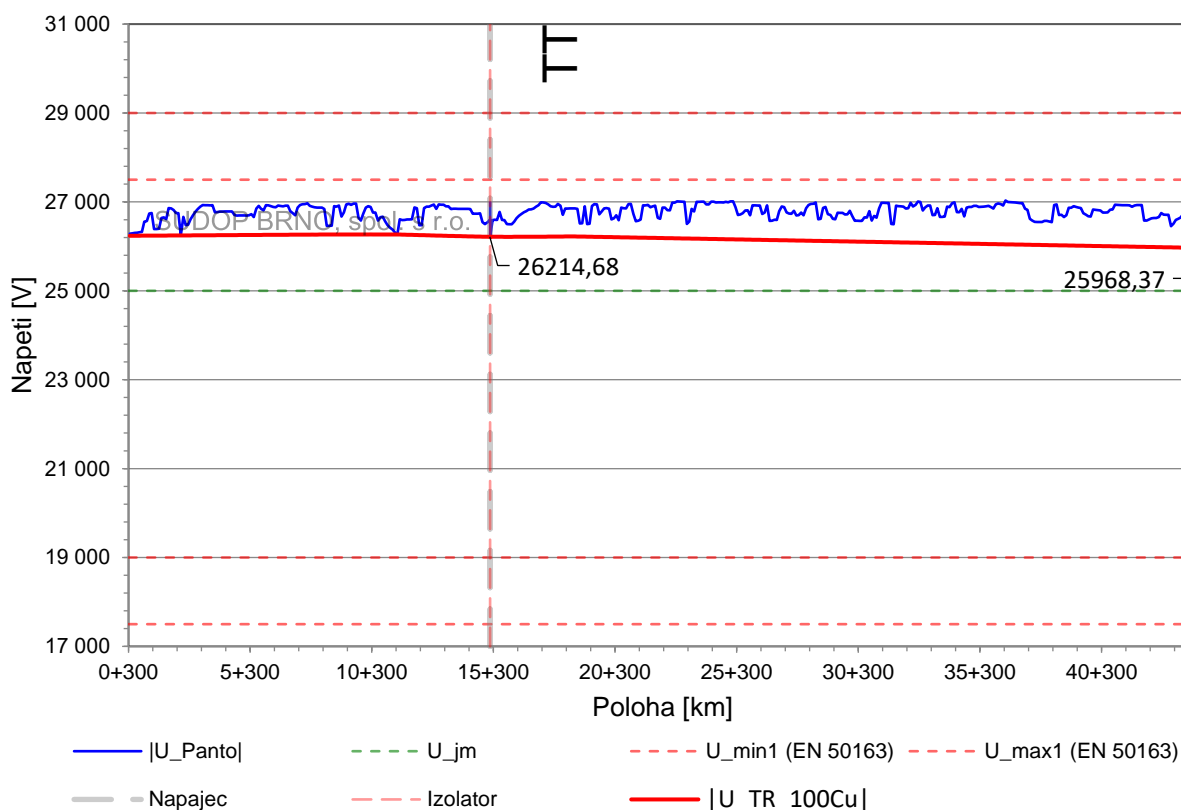
- Skutečný účinník 0,98
- Regulace výkonu dle TSI ENE ne

11.2 Výsledky simulace

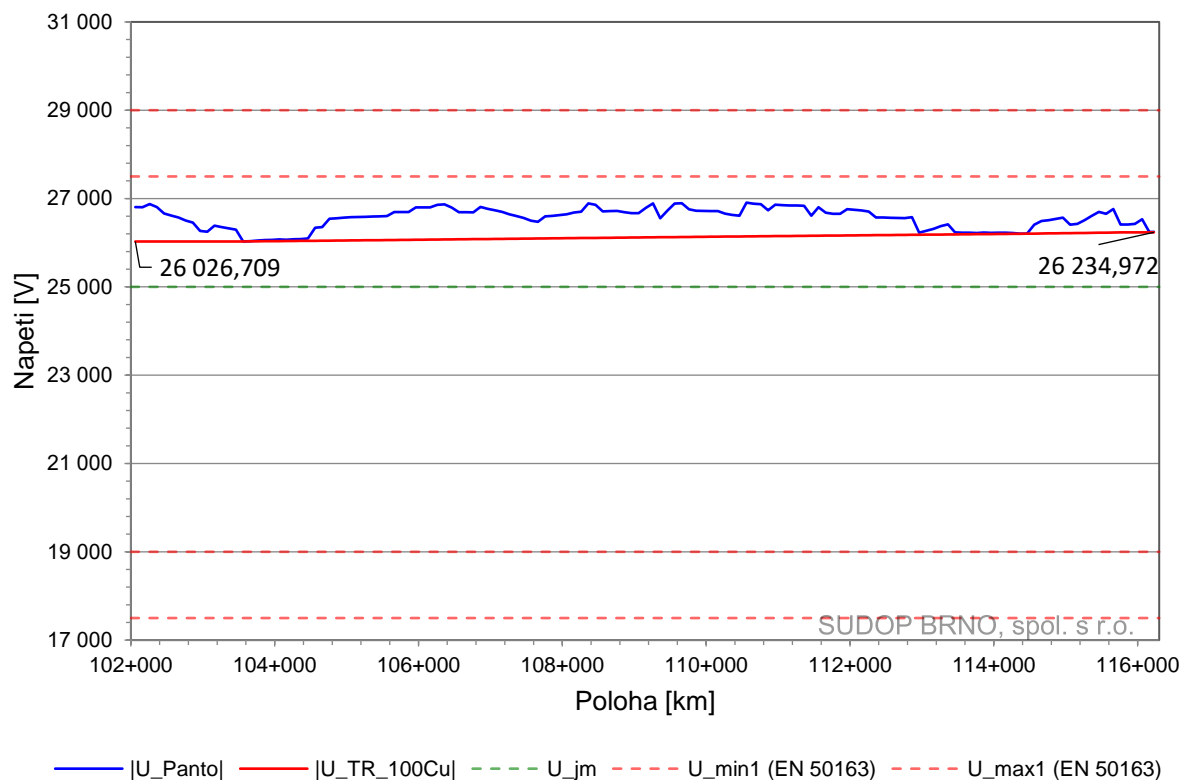
Bylo provedeno několik simulací a výsledky prokázaly schopnost navrženého stejnosměrného trakčního vedení přenést potřebný výkon v rámci celé řešené oblasti.

11.2.1 Minimální napětí v troleji

Minimální napětí v troleji je ze simulačního programu OpenPowerNet zobrazeno pomocí grafického průběhu závislosti napětí na poloze od trakční transformovny. Výstup je z důvodu změny značení polohy rozdělen na dva průběhy. V prvním průběhu (Graf 9) je zobrazeno minimální napětí v trolejovém vedení a minimální napětí na pantografovém sběrači lokomotivy pro simulovanou část úseku od žkm 0,000 po konec řešeného úseku v žkm 43,80, na druhém průběhu (Graf 10) pro úsek od žkm 115,80 po žkm 101,40. Cílem navrženého napájení je splnění normy ČSN EN 50 388 ed.2, tedy napětí nesmí klesnout pod 22,5 kV v celém řešeném úseku.



Graf 9 – Minimální napětí na troleji a pantografu – AC soustava – část 1



Graf 10 - Minimální napětí na troleji a pantografu – AC soustava – část 2

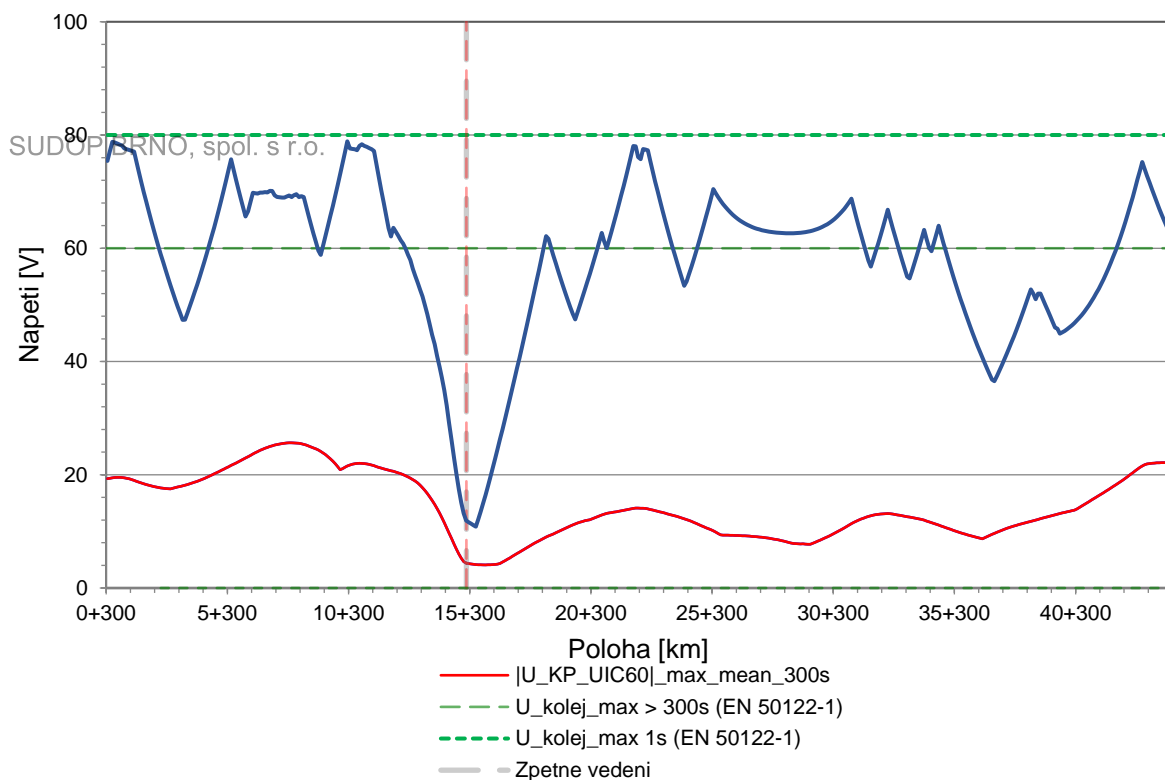
Minimální napětí trolejového vedení ani minimální napětí na pantografovém sběrači souprav nekleslo v řešené oblasti pod 22,5 kV, splňuje tedy normu ČSN EN 50 388 ed.2 a vyhovělo. Minimální hodnota napětí na troleji byla vypočítána na 25 968 V. Z výsledků je patrné, že u střídavé trakční soustavy nedochází k tak markantnímu poklesu napětí jak u stejnosměrné soustavy.

11.2.2 Maximální napětí mezi kolejí a zemí (dotykové napětí)

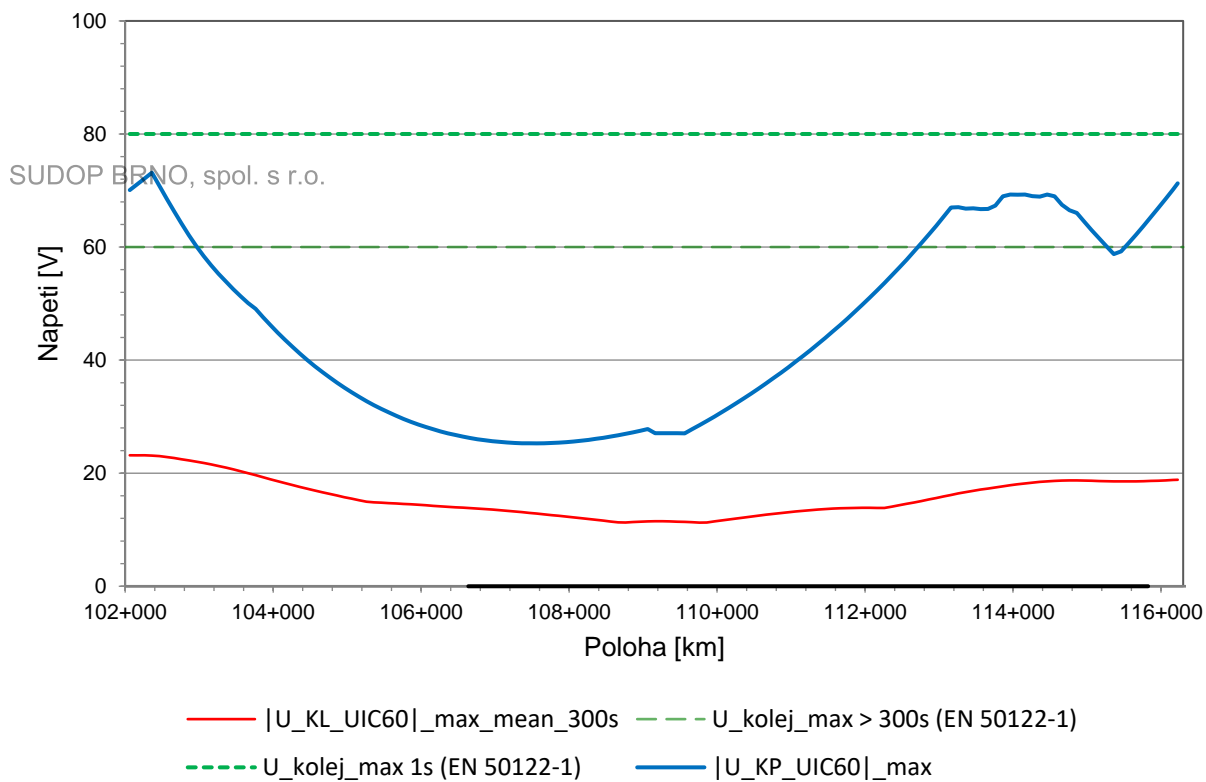
Hlavní příčinou vzniku dotykových napětí při provozních a poruchových stavech je místní a časová závislost potenciálu kolejnice. Hodnoty dovolených dotykových napětí jsou rozděleny dle normy ČSN EN 50122-1 ed.2 na dlouhodobé provozní a krátkodobé provozní hodnoty. Dlouhodobé rozumíme trvající déle než 300s a krátkodobé do 1s. Pro střídavou napájecí soustavu 25 kV 50 Hz je dlouhodobé maximum dotykového napětí 60 V a krátkodobé maximum dotykového napětí 80 V, výrazně nižší než u stejnosměrné proudové soustavy.

Potenciál mezi kolejí a zemí u střídavou proudové soustavy nedosahuje tak rapidních hodnot jak u stejnosměrného napětí, což je dáno i faktem, že uzel transformátoru je spojen se zemí a kolejí. Další výhodou střídavé trakce je možnost koleje uzemnit v jakémkoliv místě a zabránit vzniku nebezpečného dotykového napětí.

Grafické průběhy zde byly opět rozděleny na dvě části. Graf 11 zobrazuje průběh napětí mezi kolejí a zemí v řešeném úseku mezi žst.1 až žst.7, druhý graf 12 pro úsek žst.7 až žst 9.



Graf 11 – Dotykové napětí mezi kolejí a zemí – AC soustava – část 1



Graf 12 - Dotykové napětí mezi kolejí a zemí – AC soustava – část

Z průběhu napětí v grafu 11 je patrné uzemnění uzlu trakčního transformátoru v místě připojení TT, maximální hodnota krátkodobého dotykového napětí se pohybuje pod hranicí 80 V, dlouhodobé dotykové napětí není větší než 28 V, kde je tedy dostatečná rezerva a návrh vyhovuje normě ČSN EN 50122-1 ed.2. V případě naměření vyšších hodnot dotykového napětí než dovoluje norma při zkušebním provozu lze koleje uzemnit v problematických místech.

11.2.3 Proudová zatížitelnost TV a zkratové poměry

Dovolená proudová zatížitelnost vodičů používaných na trakčním vedení drah je řešena dle normy ČSN 34 1530 ed.2, která nám udává parametry daných vodičů.

Pro trolejový měděný vodič o průřezu 100 mm² udává:

- nejmenší vodivost při +20 °C 5,4644 S.km⁻¹,
- největší dovolený odpor při +20 °C 0,183 Ω.km⁻¹,
- trvalé dovolené zatížení 600 A,

pro bronzová lana o průřezu 50 mm²:

- nejmenší vodivost při +20 °C 2,270 S.km⁻¹,
- největší dovolený odpor při +20 °C 0,440 Ω.km⁻¹,
- trvalé dovolené zatížení 325 A.

Proudová zatížitelnost navrhnuté střídavé trakční sestavy **TR 100Cu mm² + NL 50Bz mm²** je stanovena normou ČSN 34 1530 ed.2 – Příloha B na hodnotu **760 A**.

V příloze 17 nalezneme průběhy proudového zatížení jednotlivých napáječů v trakční transformovně. Jednotlivé hodnoty proudu z obou napáječů jsou vypsány v následující tabulce 9, hodnoty proudu jsou odečteny z jednotlivých průběhů pro oteplovací časovou konstantu trakčního vedení 300 s. Tabulka obsahuje proudové zatížení trolejového drátu s nosným lanem v jednotlivých směrech od trakčních transformovny proudy jsou poté porovnány s přípustným zatížením sestavy a vyhodnocen.

Tabulka 9 – Proudové zatížení TV – AC soustava

Označení	I _{TR+NL_300s}	Vyhovuje/ Nevyhovuje
	A	
TV 1	201	VYHOVUJE
TV 2	165	VYHOVUJE

Minimální zkrat byl spočítán podle předpisu SŽDC (ČSD) SR 34 (E) pro nejbližší místo (styk soustav nebo konec trati) a porovnán s maximálním proudem v napájecí ze simulace.

V následující tabulce 10 jsou zobrazeny špičkové hodnoty proudu pro jednotlivé napaječe TT z přílohy 17. Veličina L nám udává délku napájeného úseku, která je důležitá pro výpočet minimálního zkratového proudu. Maximální provozní proud $I_{TR+NL_{15}} = I_{max}$ je součet špičkového proudu trolejového vedení s nosným lanem.

Při výpočtu uvažujeme navrženou trakční sestavu **TR 100Cu mm² + NL 50Bz mm²** s impedancí $0,26 + j 0,45 \Omega$.

Výpočet dle kapitoly 5.3 pro napaječ TV 1 z tabulky 10:

Reaktance transformátoru (parametry v kapitole 11.1.2)

$$jX_T = j \frac{U^2 * u_{k\%}}{P_T * 100} = \frac{27 \text{ kV} * 0,16}{16 \text{ MW} * 100} = 0,0729 \quad [\Omega] \quad (11.1)$$

Impedance trakčního vedení bud

$$\bar{Z}_V = R_V + jX_V = R_o * L + jX_o * L \quad (11.2)$$

$$\bar{Z}_V = 0,26 * 29,4 + j0,45 * 29,4 = 7,644 + j13,23 \Omega \quad (11.3)$$

Za předpokladu konstantního primárního napětí bude minimální zkratový proud

$$I_{zmin} = \frac{U_2}{\sqrt{R_V^2 + (X_T + X_V)^2}} \quad (11.4)$$

$$I_{zmin} = \frac{27 \text{ kV}}{\sqrt{7,644^2 + (0,0729 + 13,23)^2}} = 1759,8 \text{ A} \quad (11.5)$$

Jednotlivé minimální zkratové a maximální provozní proudy tedy musí splnit podmínku :

$$\frac{I_{z,min}}{1,3} > I_{nastav} > 1,2 I_{max} \quad (11.6)$$

$$1 \ 353,69 > I_{nastav} > 470,40 \quad (11.7)$$

Tabulka 10 – Zkratové poměry – AC soustava

Označení	L	I_{TR+NL_1s}	$I_{z,min}$	$I_{celk_1s} * 1,2$	$I_{z,min} / 1,3$	Vyhovuje/ Nevyhovuje
	km	A	A	A	A	
TV 1	29,4	392,00	1759,80	470,40	1353,69	VYHOVUJE
TV 2	28,8	386,00	1796,30	463,20	1381,77	VYHOVUJE

Z uvedených výsledků vyplývá, že existuje dostatečný prostor pro nastavení nadproudových ochran.

11.2.4 Výkonové zatížení TT

Podrobné průběhy výkonového zatížení trakční transformovny nalezneme v přílohách 17-19. Na rozdíl od stejnosměrné napájecí soustavy je pro nás důležitý u střídavé napájecí soustavy příkon odebíraný z distribuční sítě (Příloha 17), tak i nevyužitý rekuperovaný výkon dodávaný zpět do distribuční sítě (příloha 18).

Z simulace byly zjištěny tyto výkony TT:

Jednofázový výkon odebíraný z distribuční soustav:

Čtvrthodinový výkon P_{15min} 4,698 MW

Sekundový výkon P_{1s} 10,681 MW

Jednofázový výkon dodávaný do distribuční soustav:

Čtvrthodinový výkon P_{15min} 1,927 MW

Sekundový výkon P_{1s} 10,263 MW

Z výše zjištěných hodnot výkonů je tedy navržen standartní trakční transformátor o jmenovitém výkonu 16 MVA s třídou přetížitelnosti V. Z důvodu zajištění kritéria N-1 bude trakční transformovna osazena dvěma transformátory, v praxi při bezporuchovém provozu jsou v provozu obě jednotky, ale v případě poruchy na jednom transformátoru je schopný druhý dodat dostatečný výkon, aby nebyla narušena stabilita jízdního řádu.

11.2.5 Střední užitečné napětí oblasti a vlaku

Střední užitečné napětí se vypočítá počítačovou simulací dané geografické oblasti, se zřetelem na všechny vlaky, které mají projet touto oblastí v daném časovém intervalu odpovídajícím podle jízdního řádu době špičkového provozu. Tento časový interval musí být vhodně stanoven, aby v dané geografické oblasti bylo vzato v úvahu nejvyšší zatížení každého elektrického úseku, v našem případě tedy 6 – 8 h.

Při simulaci je nutné vzít v úvahu elektrické charakteristiky infrastruktury a každý odlišný typ vlaku. Základní napětí na sběrači každého vlaku v dané geografické oblasti je analyzováno v každém časovém kroku simulace. U střídavých soustav se používají efektivní hodnoty základního

napětí. Tento časový krok musí být při simulaci dostatečně krátký ,aby byl vzat zřetel na všechny události v jízdním řádu.

Minimální hodnota středního užitečného napětí na sběrači za normálních pracovních podmínek pro jmenovité napětí 25 kV 50 Hz je **22 kV**.

Střední užitečné napětí vlaku

Představuje střední hodnotu všech napětí v téže simulaci, jako je studie dané geografické oblasti, avšak analyzují se pouze napětí pro určitý vlak v každém časovém kroku, kdy vlak odebírá trakční zatížení (neberou se v úvahu kroky, kdy vlak stojí, při rekuperaci nebo při jízdě výběhem).

Střední hodnota těchto napětí je kontrolou výkonnosti každého vlaku v simulaci a jako výsledek této kontroly je určen dimenzovaný vlak, tedy vlak, jehož schopnost akcelerace je slabým napětím nejvíce omezena, viz tabulka 11.

Tabulka 11- Střední užitečné napětí vlaku

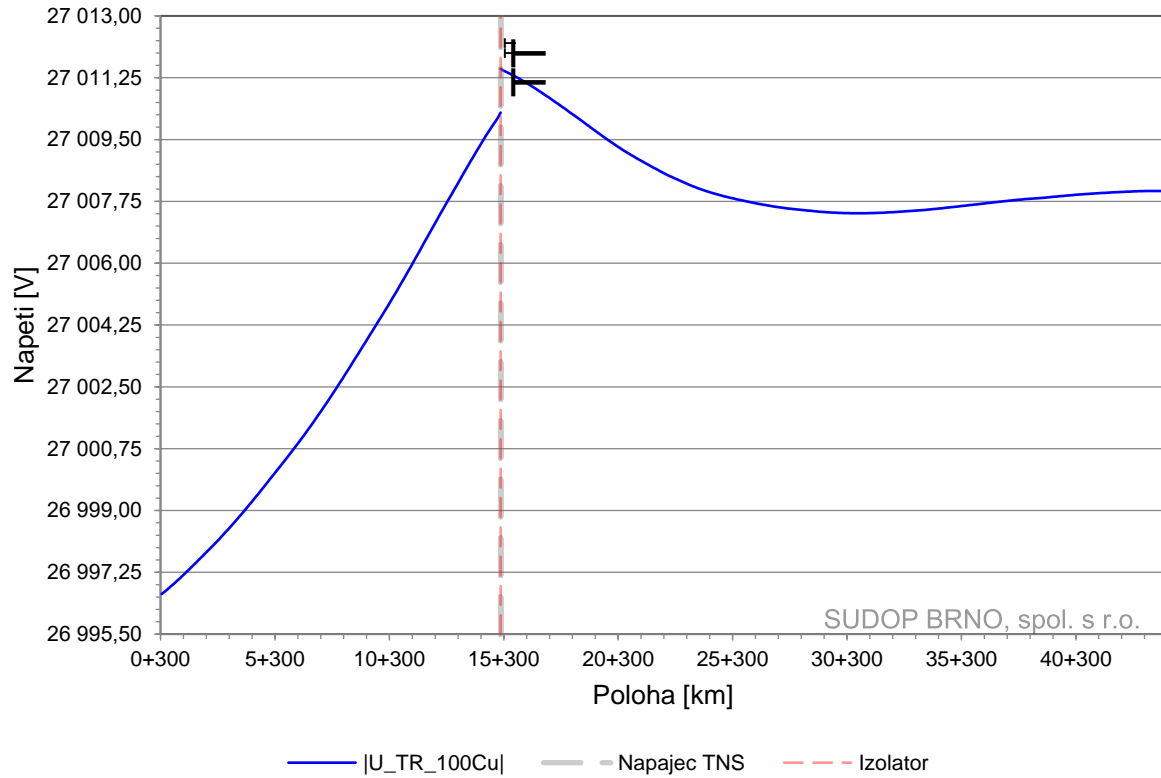
spoj	formace	lokomotivy	U _{stř}
			V
celkem		11	26 993
<i>Maximum</i>		1	27 018
<i>Minimum</i>		1	26 867
EC 200	EC	1	26 951
EC 202	EC	1	26 867
EC 301	EC	1	26 983
EC 303	EC	1	26 909
Os 2000	Os	1	26 913
Os 2002	Os	1	26 924
Os 2004	Os	1	26 994
Os 2006	Os	1	26 969
Sp 1802	Os	1	27 018
Sp 1804	Os	1	26 978
Sp 1806	Os	1	26 931

Z výsledků je patrné, že minimální napětí vlaku v tabulce 11 nekleslo pod 22 kV, tedy vyhovuje. Minimální střední užitečné napětí vlaku vyšlo 26 867 V.

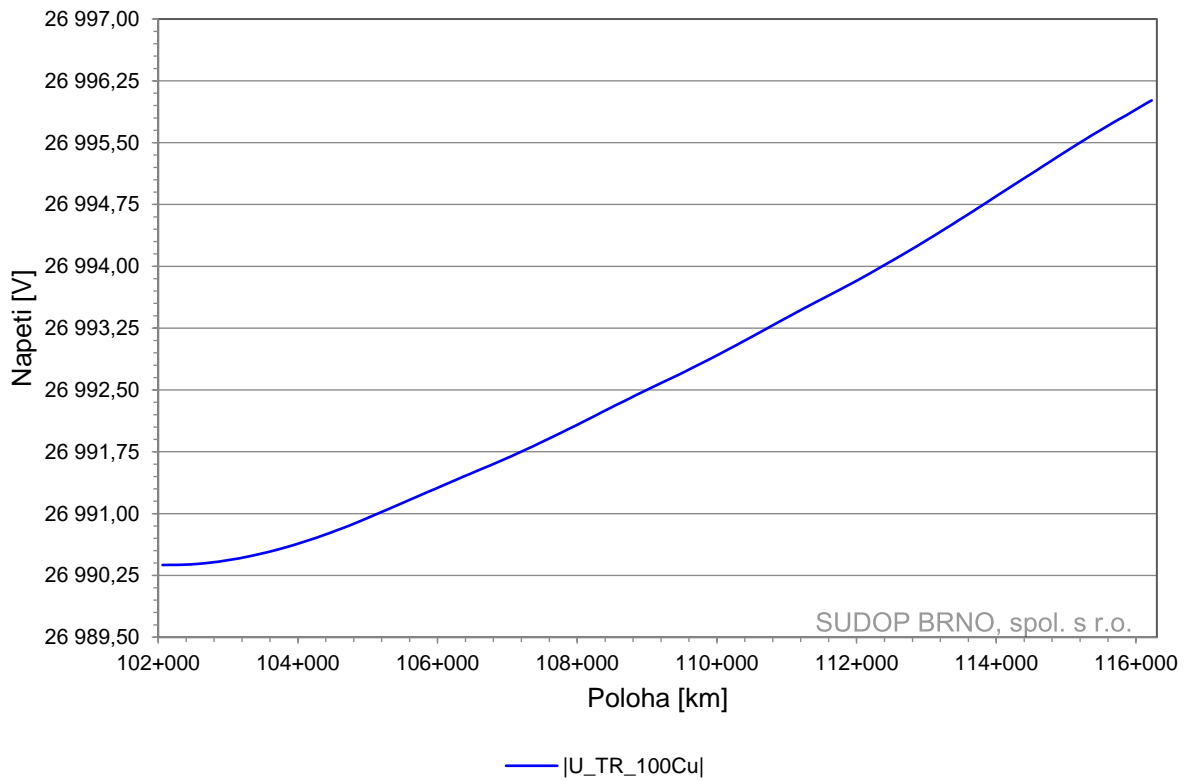
Střední užitečné napětí oblasti

Představuje střední hodnotu všech napětí analyzovaných v simulaci a indikuje jakost napájení pro celou oblast. Do této analýzy jsou v každém časovém kroku simulace v dané geografické oblasti zahrnuty všechny vlaky v uvažované době špičkového provozu, ať jsou v trakčním režimu nebo nikoliv (tedy ve stavu klidu, při trakci, rekuperaci).

Z grafů 1 a 2 je zřejmý vyhovující stav navrženého trakčního napájení, napětí v oblasti nikde nekleslo pod hranici 22 kV.



Graf 13 – Střední užitečné napětí oblasti – AC soustava – část 1



Graf 14 - Střední užitečné napětí oblasti – AC soustava – část 2

Z tabulky 12 bylo určeno množství průjezdů párů vlaků za den v daném úseku, poté bylo přistoupeno k výpočtu celkové spotřebované energie. Výpočet byl proveden pro oba směry zadané dopravy.

Příklad výpočtu pro úsek č. 6 z tabulky 13:

Tažná síla

$$F_t = \frac{m * g * (p_0 + s_r)}{1000} \text{ [kN]} \quad (12.1)$$

$$F_t = \frac{175 \text{ t} * 9,81 * (11 + 1,4)}{1000} = 21,3 \text{ kN} \quad (12.2)$$

Výkon lokomotivy

$$P = \frac{F_t * v}{3,6} \text{ [kW]} \quad (12.3)$$

$$P = \frac{21,28 \text{ kN} * 160 \text{ km/h}}{3,6} = 945 \text{ kW} \quad (12.4)$$

Proud lokomotivy

$$I = \frac{P}{U_{stř} * \eta * \cos\varphi} + I_{vl.spotř.} \text{ [A]} \quad (12.5)$$

$$I = \frac{945 \text{ kW}}{2,7 \text{ kV} * 0,85 * 0,98} + 70 \text{ A} = 482 \text{ A} \quad (12.6)$$

Dopravní výkon

$$D_p = \frac{m * L * n}{1000} \left[\frac{\text{tkm}}{\text{den}} \right] \quad (12.7)$$

$$D_p = \frac{175 \text{ t} * 15,7 \text{ km} * 9}{1000} = 25 \frac{\text{tkm}}{\text{den}} \quad (12.8)$$

Měrná spotřeba energie

$$W_o = \frac{(23,35 + 3,336 * s_r) * v}{100} \left[\frac{Wh}{tkm} \right] \quad (12.9)$$

$$W_o = \frac{(23,35 + 3,336 * 1,4 \%) * 160km/h}{100} = 45 \frac{Wh}{tkm} \quad (12.10)$$

Denní spotřeba energie

$$A_d = D_p * W_o \left[\frac{kWh}{den} \right] \quad (12.11)$$

$$A_d = 25 * 45 = 1125 \left[\frac{kWh}{den} \right] \quad (12.12)$$

kde	m	hmotnost soupravy
	g	tíhové zrychlení
	p_0	měrný jízdní odpor
	s_r	redukovaný sklon
	v	rychlost lokomotivy
	$U_{stř}$	střední napětí
	η	účinnost
	$\cos\varphi$	skutečný účinník lokomotivy
	L	délka řešeného úseku
	n	počet párů vlaků v řešeném úseku
	$I_{vl.spotř.}$	Proud vlastní spotřeby – 70 A

Z výpočtu byla zjištěna spotřeba energie pro každý řešený úsek, součtem energií všech úseků získáme celkovou energii spotřebovanou za den, pro naši navrženou trať je to tedy **58,26 MWh/den**.

Celková kalkulace stejnosměrného napájení je provedena v tabulce 13, kde bylo dle návrhu uvažování s pěti trakčními měnírnami a stejnosměrnou proudovou sestavou. V celkové ceně se nám nejvíce projevila celková spotřebovaná energie v rozsahu 30ti let, která se u stejnosměrného napájení skládá z energie potřebné pro drážní odběry (vlaky) a ztrát které jsou reprezentovány 15 % v trakčním vedení a bludnými proudy, které se uvažují pouze u stejnosměrného napájení.

Tabulka 13 – Kalkulace návrhu DC soustavy

	Jednotky	Množství	Sazba	Cena
			mil. Kč/m.j.	mil. Kč
Technologie trakční měničky	ks	5	102,25	511
Trakční vedení - stejnosměrná soustava (trať)	km	49,2	8,053	396
Trakční vedení - stejnosměrná soustava (stanice)	km	9	8,808	79
Cena energie za kWh	Kč		3	
Spotřeba energie za den	MWh/den	58,26		
Spotřeba energie za rok	MWh/rok	21264,9	3	63795
Uvažované ztráty - DC soustava (15 %)	MWh/rok	3189,735	3	9569
Celková energie spotřebovaná za rok	MWh/rok	24454,64	3	73364
Bludné proudy (0,83 Kč/kWh)				18
Inflace	%		2,9	
Součet - pevná trakční zařízení				987
Součet - energie a ztráty (1 rok)				73382
Součet - energie a ztráty (30 let)				3435147

3435 mld. Kč

Celková kalkulační střídaného napájení je provedena v tabulce 14, kde bylo dle návrhu uvažováno s jednou trakční transformovnou a střídanou proudovou sestavou. V celkové ceně se nám opět nejvíce projevila celková spotřebovaná energie v rozsahu 30ti let, která se u střídaného napájení skládá z energie potřebné pro drážní odběry (vlaky) a ztrát které jsou reprezentovány 3 % v trakčním vedení.

Tabulka 14 - Kalkulace návrhu AC soustavy

	Jednotky	Množství	Sazba	Cena
			mil. Kč/m.j.	mil. Kč
Technologie trakční transformovny	ks	1	92,472	92
Trakční vedení - střídaná soustava (trať)	km	49,2	6,644	327
Trakční vedení - střídaná soustava (stanice)	km	9	7,248	65
Cena energie za kWh	Kč		3	
Spotřeba energie za den	MWh/den	58		
Spotřeba energie za rok	MWh/rok	21265	3	63795
Uvažované ztráty - DC soustava (15 %)	MWh/rok	638	3	1914
Celková energie spotřebovaná za rok	MWh/rok	21903	3	65709
Inflace	%		2,9	
Součet - pevná trakční zařízení				485
Součet - energie a ztráty (1 rok)				65709
Součet - energie a ztráty (30 let)				3075957

3076 mld. Kč

Z ekonomického porovnání je zřejmá úspora při využití střídané proudové soustavy. Náklady na výstavbu a realizaci stejnosměrného napájení činí 987 mil. Kč, u střídaného napájení 485 mil. Kč, náklady na střídanou soustavu jsou tedy až o poloviny (502 mil. Kč) nižší než u stejnosměrné soustavy, markantnější část ovšem tvoří úspora z hlediska spotřebované energie a díky menším ztrátám na střídané proudové soustavě je úspora v 30-ti letém období až 359 mld. Kč.

Tabulka 15 – Výpočet celkové spotřeby energie

Číslo úseku			1	2	3	4	5	6	7	8
U _{stř} (kV) =			2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
Délka úseku (km)			1,3	6	3,7	10,9	6,5	15,7	3,6	10,5
Redukovaný sklon s _r (°/00)	→	5	13,9	4,1	-11,6	-6,3	1,4	-6,7	-1,5	
	←	-4,4	-12,9	-2,9	13,2	7,3	-1,3	6,8	1,7	
Sp	Tažná síla F _t (kN)	→	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	21,3	7,4	16,3
		←	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	16,6	30,5	21,8
	Výkon loko P (kW)	→	0	0	0	0	0	945	328	724
		←	0	0	0	0	0	739	1357	968
	Proud loko I (A)	→	70	70	70	70	70	482	213	386
		←	70	70	70	70	70	392	661	492
	Dopravní výkon D _p · 10 ³ (tkm/d)	→	0	0	0	0	0	25	6	17
		←	0	0	0	0	0	25	6	17
Měrná spotřeba energie w (Wh/tkm)	→	0	0	0	4	4	45	4	29	
	←	0	4	0	0	0	30	74	46	
Denní spotřeba energie A _d (kWh/d)	→	0	0	0	0	0	1109	25	485	
	←	0	0	0	0	0	752	418	768	
Os	Tažná síla F _t (kN)	→	18,0	33,3	16,5	0,0	0,0	21,3	7,4	16,3
		←	1,9	0,0	4,5	32,1	22,0	16,6	30,5	21,8
	Výkon loko P (kW)	→	500	924	457	0	0	945	328	724
		←	52	0	124	891	610	739	1357	968
	Proud loko I (A)	→	288	473	269	70	70	482	213	386
		←	93	70	124	458	336	392	661	492
	Dopravní výkon D _p · 10 ³ (tkm/d)	→	3	15	9	27	16	52	12	35
		←	3	15	9	27	16	52	12	35
Měrná spotřeba energie w (Wh/tkm)	→	70	112	66	18	18	86	18	65	
	←	27	18	34	108	81	66	126	88	
Denní spotřeba energie A _d (kWh/d)	→	224	1642	601	486	290	4490	218	2252	
	←	86	268	307	2897	1292	3445	1509	3081	
EC	Tažná síla F _t (kN)	→	77,2	142,6	70,6	0,0	0,0	91,1	31,6	69,8
		←	8,1	0,0	19,1	137,4	94,1	71,3	130,8	93,3
	Výkon loko P (kW)	→	2144	3961	1960	0	0	3038	1054	2328
		←	225	0	531	3818	2613	2377	4361	3112
	Proud loko I (A)	→	1054	1846	974	120	120	1444	579	1134
		←	218	120	351	1784	1259	1156	2020	1476
	Dopravní výkon D _p · 10 ³ (tkm/d)	→	12	54	33	98	59	141	32	95
		←	12	54	33	98	59	141	32	95
Měrná spotřeba energie w (Wh/tkm)	→	40	70	37	4	4	34	4	22	
	←	9	4	14	67	48	23	55	35	
Denní spotřeba energie A _d (kWh/d)	→	468	3765	1233	427	254	4751	141	2080	
	←	101	235	455	6610	2791	3224	1790	3291	
Ad celkem (MWh/d)			0,88	5,91	2,60	10,42	4,63	17,77	4,10	11,96
Ad celkem (MWh/d)			24,43				33,83			
Ad celkem (MWh/d)			58,26							

13 ZÁVĚR

V úvodu diplomové práce byl popsán historický vývoj elektrizace železnic jak v Československu, tak ve světě. Poté byl proveden rozbor výpočtu základních elektrických veličin nutných k správnému návrhu elektrizace železnice a seznámení s dnes nejčastějšími proudovými soustavami v České Republice.

V praktické části diplomové práce byla vytvořena dopravní infrastruktura pro zadanou hustotu dopravy. V této části byl řešen počet železničních stanic a zastávek, maximální rychlost v řešeném úseku a topografický profil tratě. Výsledný model obsahoval 9 železničních stanic a 8 železničních zastávek. Tyto parametry byly použity pro výpočet grafikonu vlakové dopravy v programu OpenTrack, který později slouží jako paralelní program pro výpočet elektrických veličin navrženého modelu.

V další části byl proveden návrh stejnosměrné napájecí soustavy 3 kV pro zadaný model. Byl proveden orientační výpočet úbytku napětí pro vhodné rozmístění napájecích měníren. Navrženo bylo pět trakčních měníren umístěných podél trati s délkou meziměřírenského úseku 11 km až 17,8 km a trakční sestavou TR 150Cu mm² + NL 120Cu mm² + ZV 120Cu mm². Navržené parametry trakční sestavy a rozmístění trakčních měníren byly namodelovány v programu OpenPowerNet a odsimulovány. Z výsledků bylo zjištěno zajištění dostatečného napájení jednotlivých meziměřírenských úseků z hlediska úbytku napětí. Objevil se ale problém s velikostí dotykového napětí mezi kolejí a zemí, které překračovalo dovolené krátkodobé napětí dle normy, tento problém byl řešen umístěním několika zařízení pro omezení potenciálu mezi kolejí a zemí (VLD-O) v problematických úsecích.

Při návrhu střídavé napájecí soustavy 25 kV 50 Hz bylo počítáno s jednou trakční transformovnou uprostřed řešeného úseku a trakční sestavou TR 100Cu mm² + NL 50Bz mm². Byl proveden výpočet úbytku napětí pro kratší, ale dopravně vytiženější jednostranně napájený úsek, který vyhověl. Simulace nám ale později potvrdila, že u střídavých proudových soustav není tak markantní pokles napětí na trolejovém vedení jak u stejnosměrné soustavy, omezujícím faktorem je proudová zatížitelnost trakčního vedení a zkratové poměry. Výsledný návrh vyhověl dle všech kritérií.

V poslední části diplomové práce bylo řešeno ekonomické srovnání obou návrhů elektrizace jednokolejné trati v časovém rozsahu 30-ti let. Nejvyšší cenová položka u obou návrhů byla celková spotřeba energie. Díky bludným proudům a vyšším ztrátám na trakčním vedením stejnosměrná soustava vycházela o 356 mld. Kč dražší a celková cena za pevná trakční zařízení, které představují napájecí stanice a trakční vedení, byla dvakrát dražší, to je samozřejmě způsobeno nutností většího množství trakčních měníren.

POUŽITÁ LITERATURA

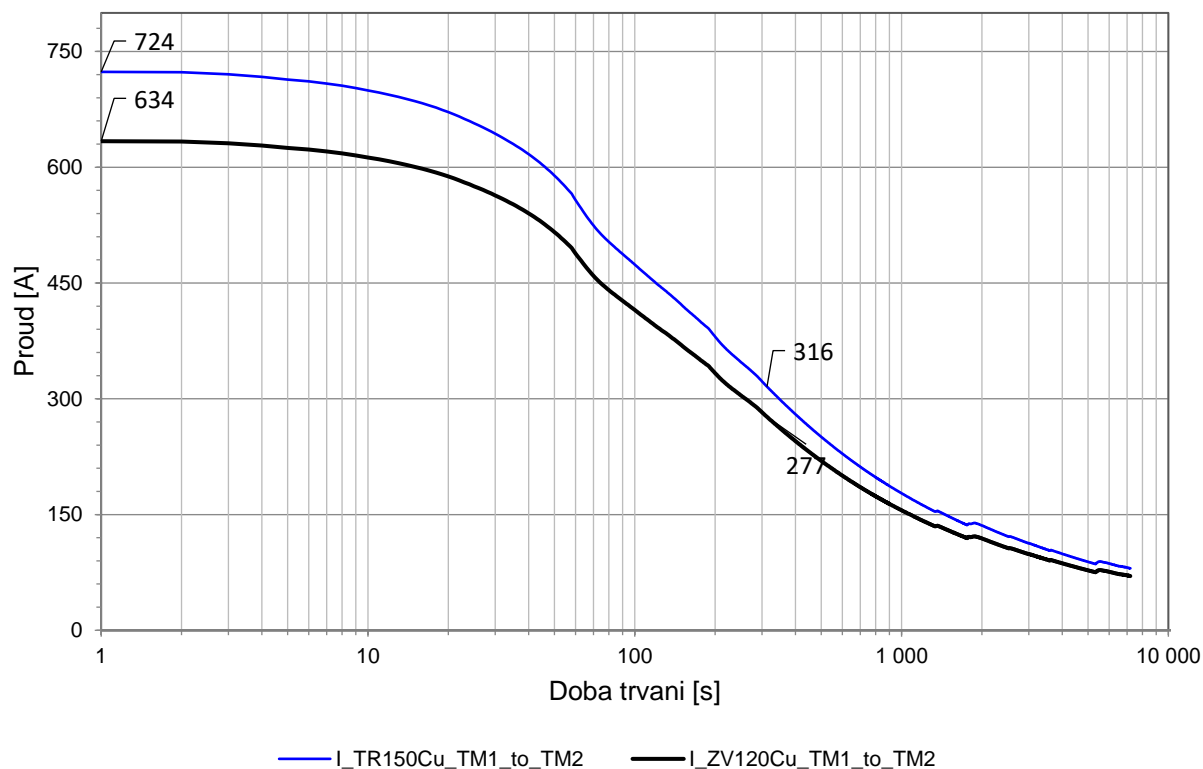
- [1] Jansa, F. *Přednášky postgraduálního studia elektrické trakce a energetiky v dopravě III*; ALFA, N.P. Bratislava: Vysoká škola dopravná v Žilině,
- [2] Mader, V. *Výpočty trakčních měření*,.; Vydavatelství technickej literatury,N.P., Bratislava: Vysoká škola dopravná v Žilině,1963.
- [3] Jansa, F. *Teorie elektrické trakce*; Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, N.P.,Bratislava: Vy, 1972.
- [4] Jansa,Peleňský *Napájení elektrických drah III*; Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry Bratislava: Vysoká škola dopravná v Žilině, 1976.
- [5] Lanáková, G. *Vybrané state z pevných trakčných zariadení*; Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry Bratislava: Vysoká škola dopravy a spoj v Žilině, 1987.
- [6] ČSN 34 1530 ed.2 *Drážní zařízení - Elektrická trakční vedení železničních drah celostátních,regionálních a vlečků*; Úřad pro technickou normalizaci,metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [7] ČSN EN 50 388 *Drážní zařízení – Napájení a drážní vozidla – Technická kritéria pro koordinaci mezi napájením (napájecí stanice) a drážními vozidly pro dosažení interoperability*; Český normalizační institut, 2010.
- [8] ČSN EN 50 122 ed.2 *Drážní zařízení - Pevná trakční zařízení - část 2*; Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [9] ČSN EN 50 163 ed.2 *Drážní zařízení - napájecí napětí trakčních soustav*; Český normalizační institut, 2005.
- [10] RegioPanter 640. Atlasvozu.cz.
<http://www.atlasvozu.cz/souprava/cd/regiopanter.html> (accessed Feb 19, 20).
- [11] Siemens Vectron. Wikipedie. https://cs.wikipedia.org/wiki/Siemens_Vectron (accessed Aug 08, 19).

SEZNAM PŘÍLOH

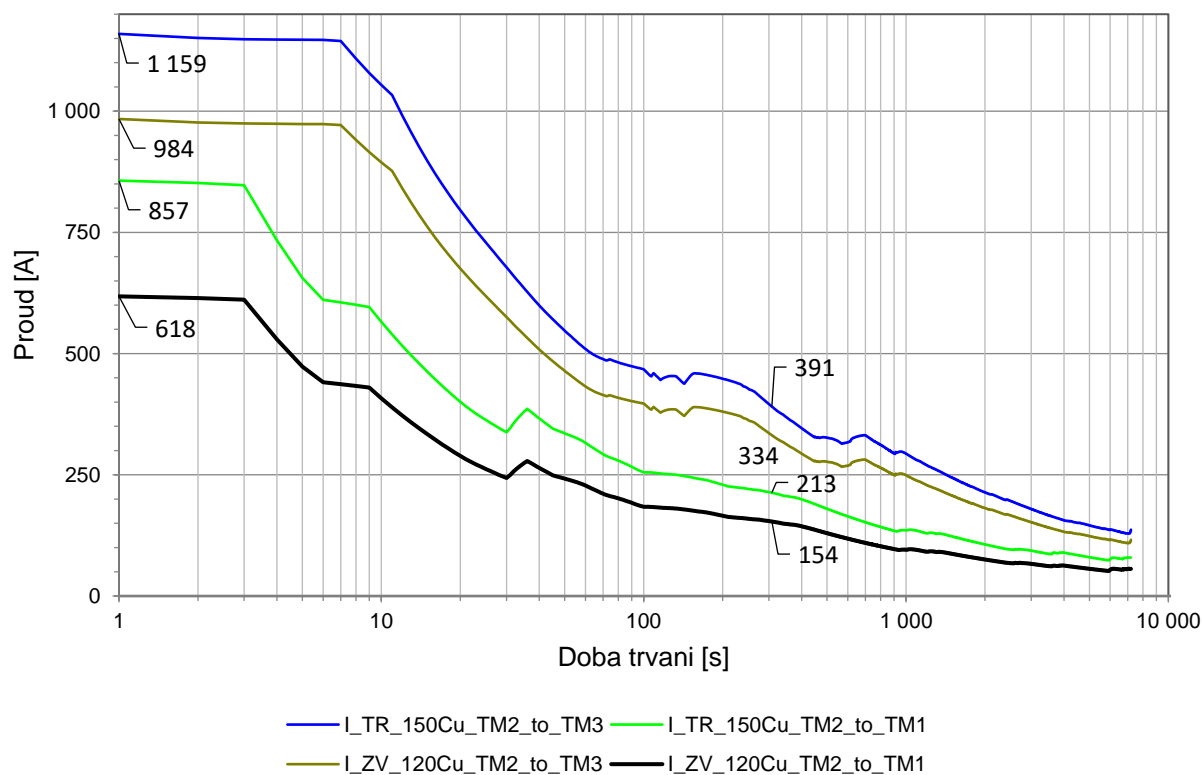
PŘÍLOHY	95
1 PROUDOVÉ ZATÍŽENÍ TV - TM 1.....	95
2 PROUDOVÉ ZATÍŽENÍ TV – TM 2.....	95
3 PROUDOVÉ ZATÍŽENÍ TV – TM 3.....	96
4 PROUDOVÉ ZATÍŽENÍ TV – TM 4.....	96
5 PROUDOVÉ ZATÍŽENÍ TV – TM 5.....	97
6 VÝKONOVÉ ZATÍŽENÍ TM 1	97
7 VÝKONOVÉ ZATÍŽENÍ TM 2	98
8 VÝKONOVÉ ZATÍŽENÍ TM 3	98
9 VÝKONOVÉ ZATÍŽENÍ TM 4	99
10 VÝKONOVÉ ZATÍŽENÍ TM 5	99
11 PRŮBĚH VÝKONU V ZÁVISLOSTI NA ČASE $P=F(T)$ – TM 1	100
12 PRŮBĚH VÝKONU V ZÁVISLOSTI NA ČASE $P=F(T)$ – TM 2	100
13 PRŮBĚH VÝKONU V ZÁVISLOSTI NA ČASE $P=F(T)$ – TM 3	101
14 PRŮBĚH VÝKONU V ZÁVISLOSTI NA ČASE $P=F(T)$ – TM 4	101
15 PRŮBĚH VÝKONU V ZÁVISLOSTI NA ČASE $P=F(T)$ – TM 5	102
16 PROUDOVÉ ZATÍŽENÍ TV - TT	103
17 VÝKONOVÉ ZATÍŽENÍ TT – ODBĚR.....	103
18 VÝKONOVÉ ZATÍŽENÍ TT – DODÁVKA.....	104
19 PRŮBĚH VÝKONU V ZÁVISLOSTI NA ČASE $P=F(T)$ – TT	104

PŘÍLOHY

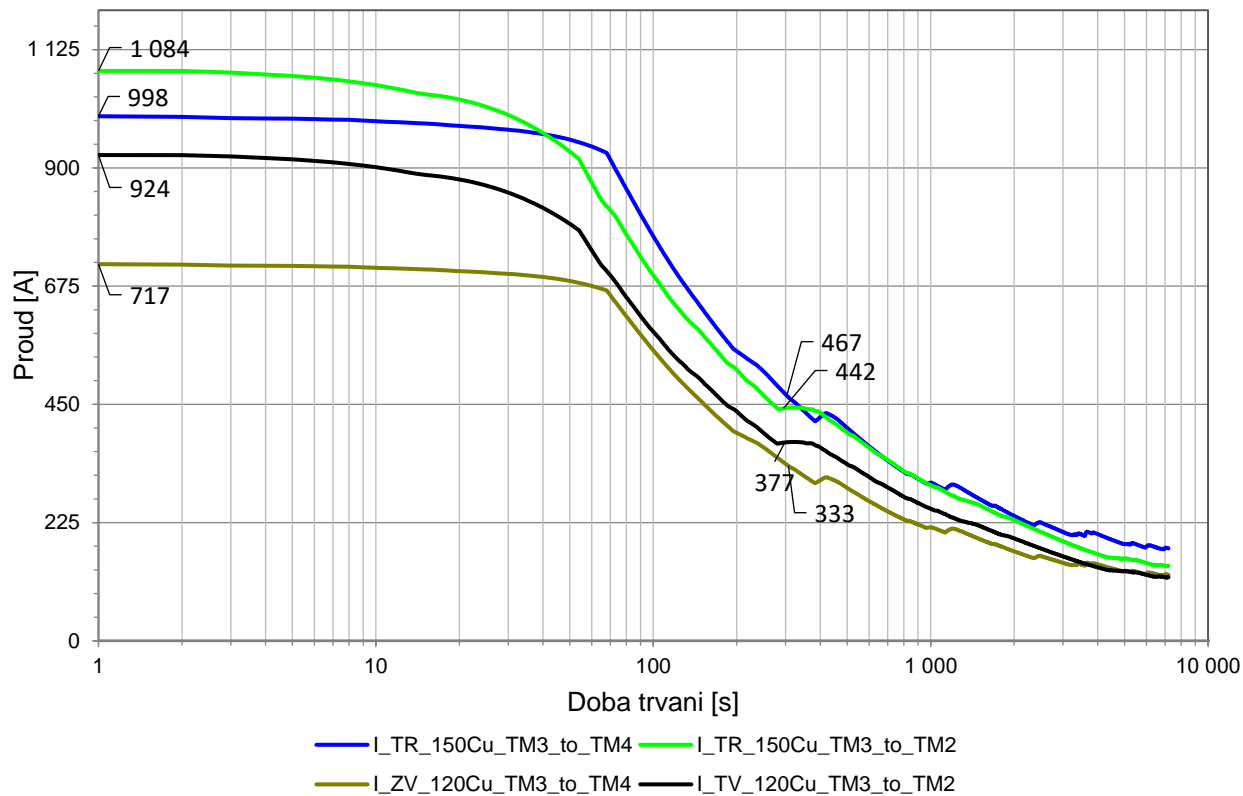
1 PROUDOVÉ ZATÍŽENÍ TV - TM 1



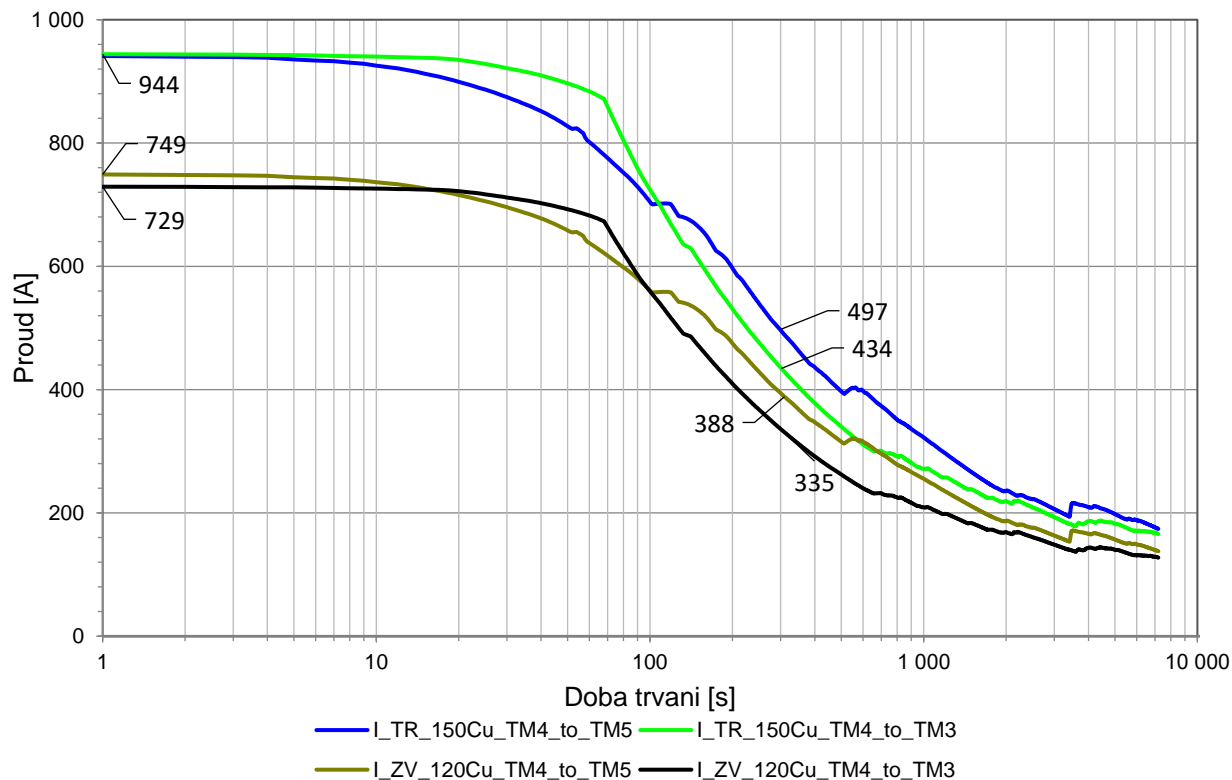
2 PROUDOVÉ ZATÍŽENÍ TV – TM 2



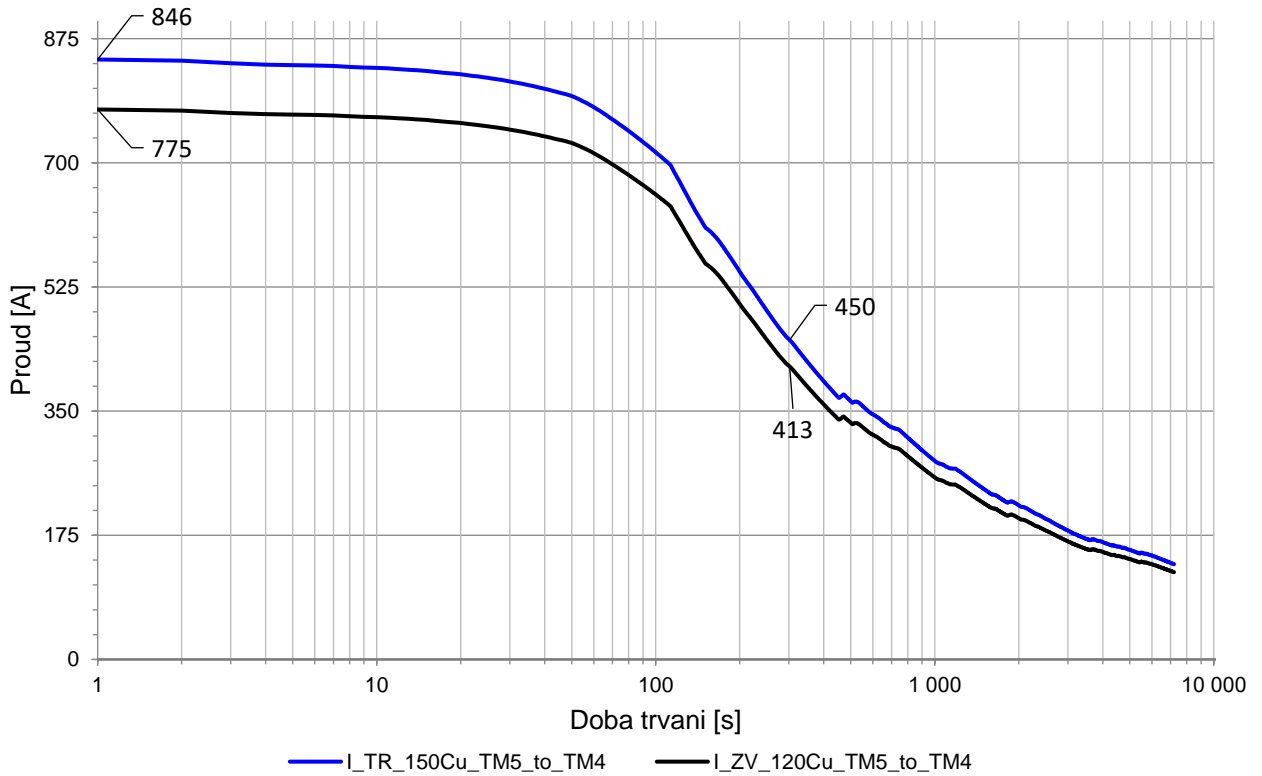
3 PROUDOVÉ ZATÍŽENÍ TV – TM 3



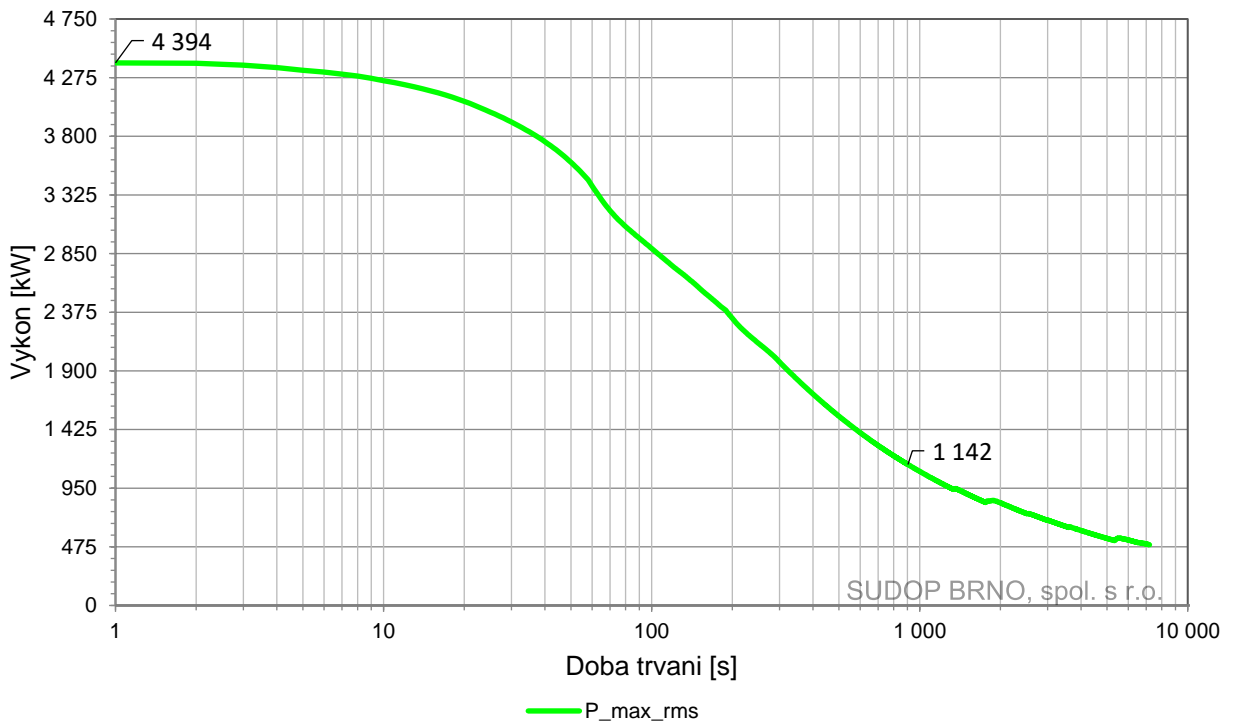
4 PROUDOVÉ ZATÍŽENÍ TV – TM 4



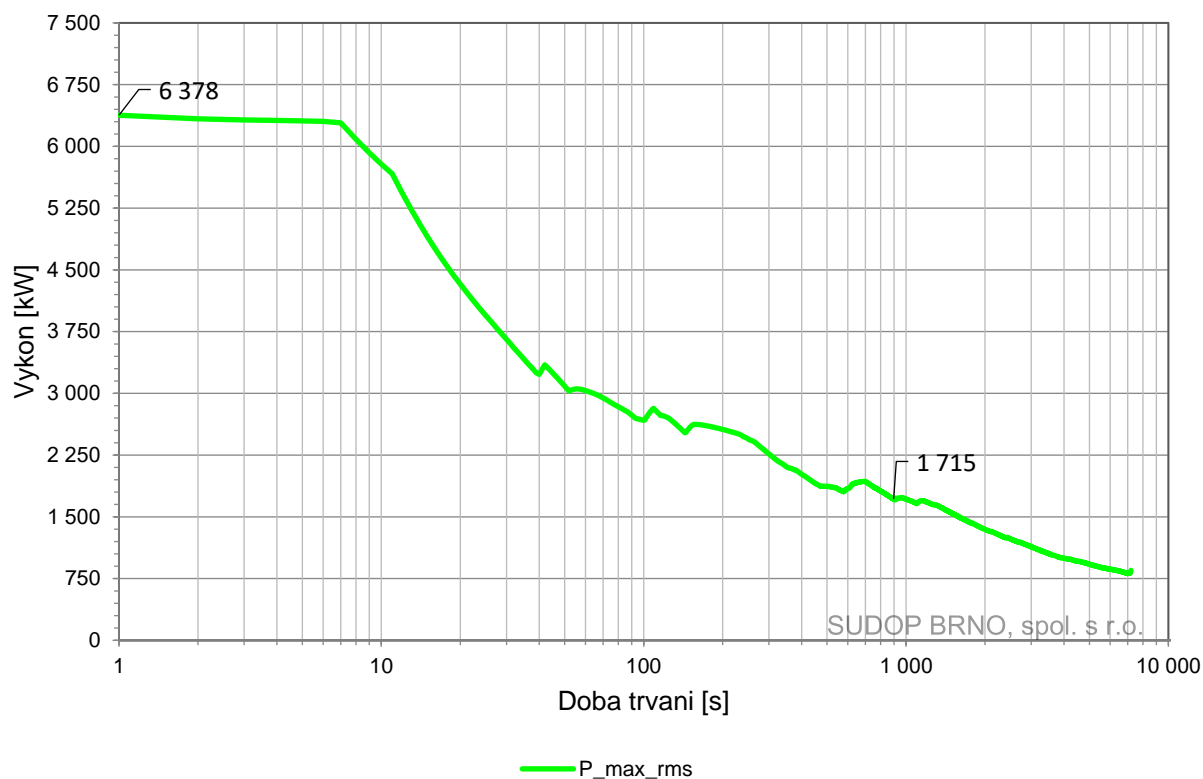
5 PROUDOVÉ ZATÍŽENÍ TV – TM 5



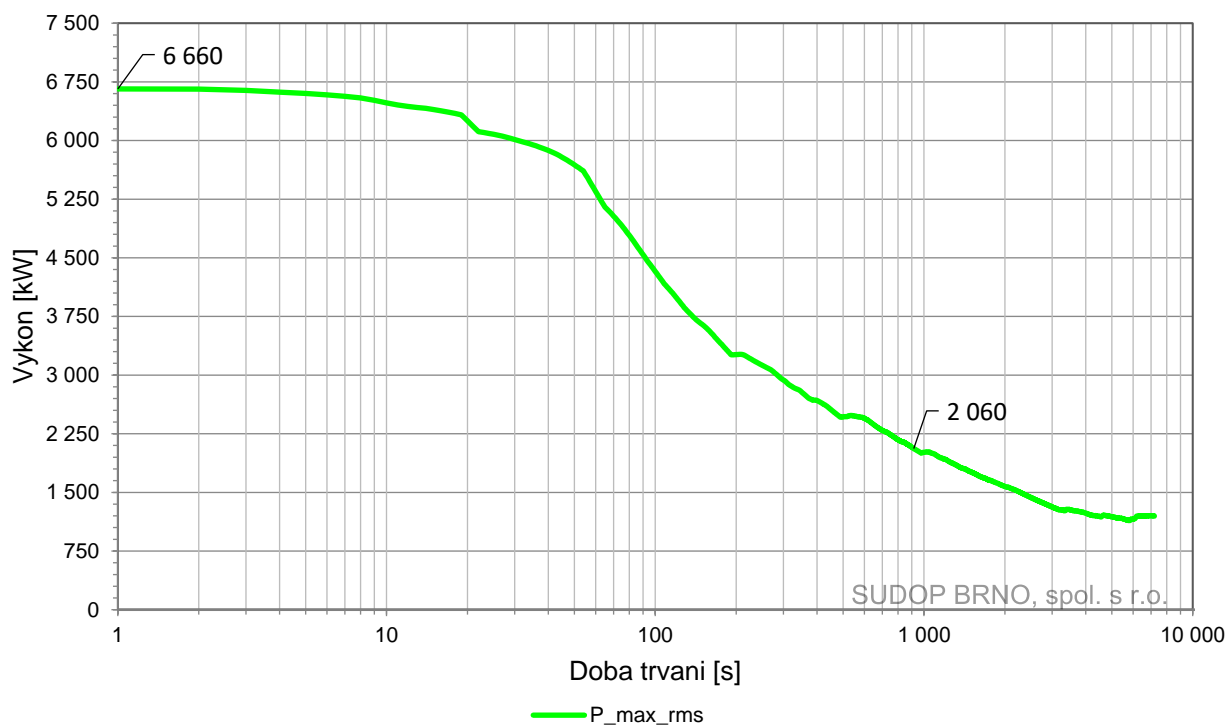
6 VÝKONOVÉ ZATÍŽENÍ TM 1



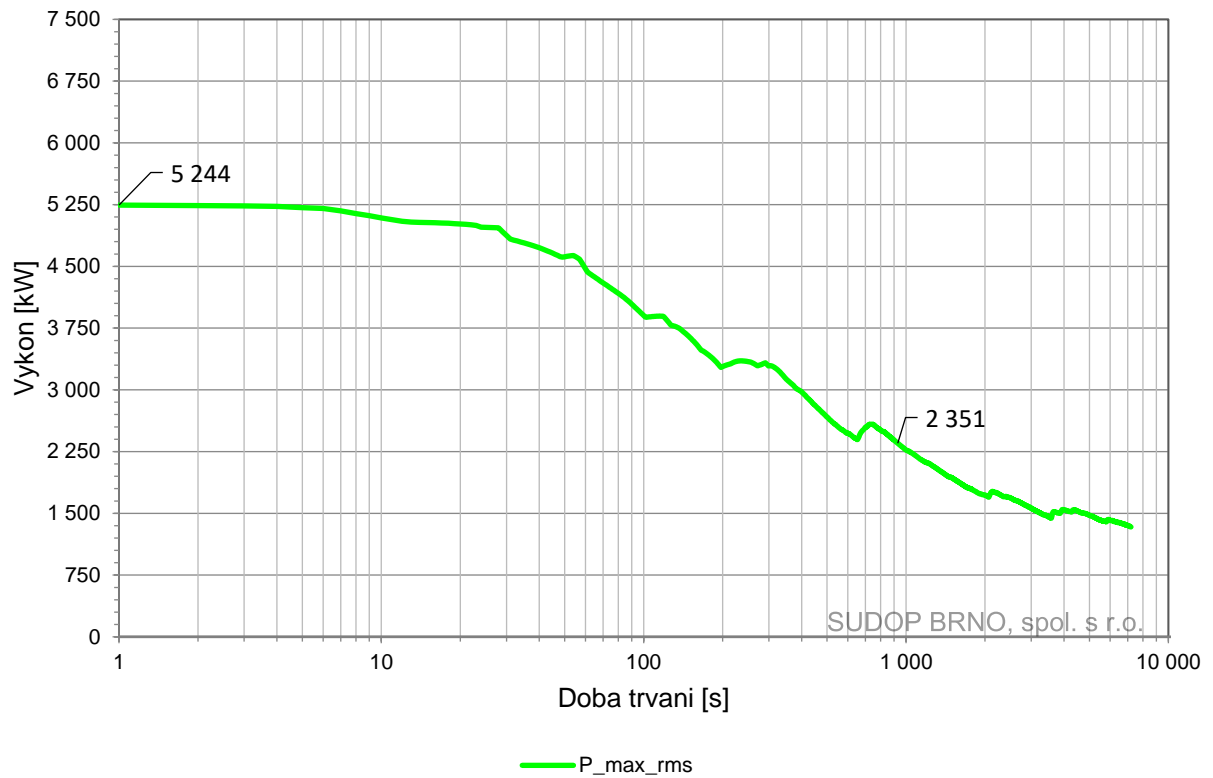
7 VÝKONOVÉ ZATÍŽENÍ TM 2



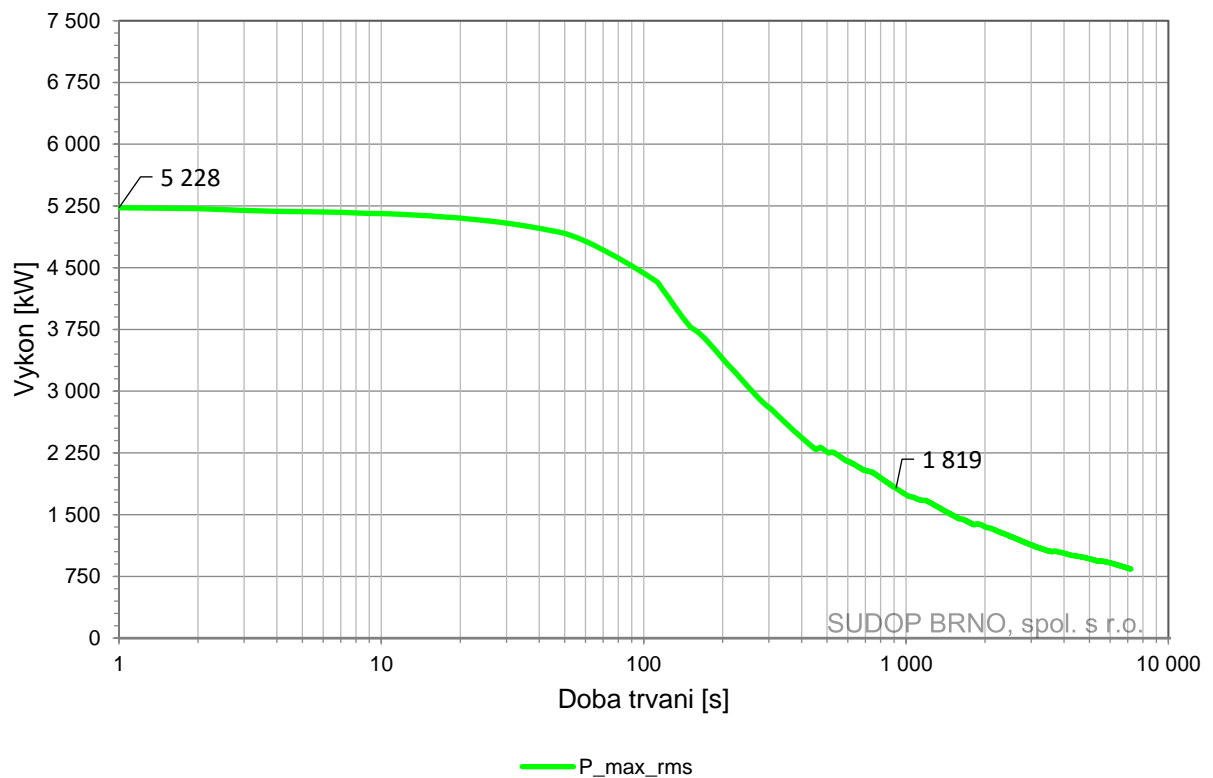
8 VÝKONOVÉ ZATÍŽENÍ TM 3



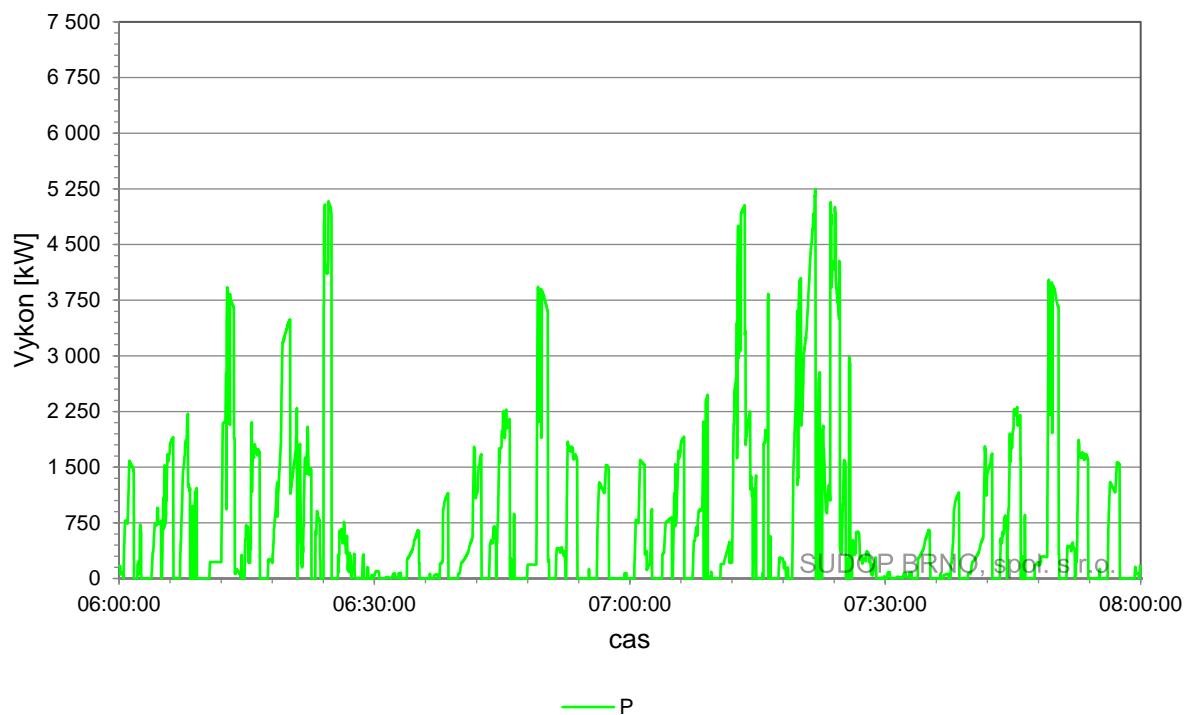
9 VÝKONOVÉ ZATÍŽENÍ TM 4



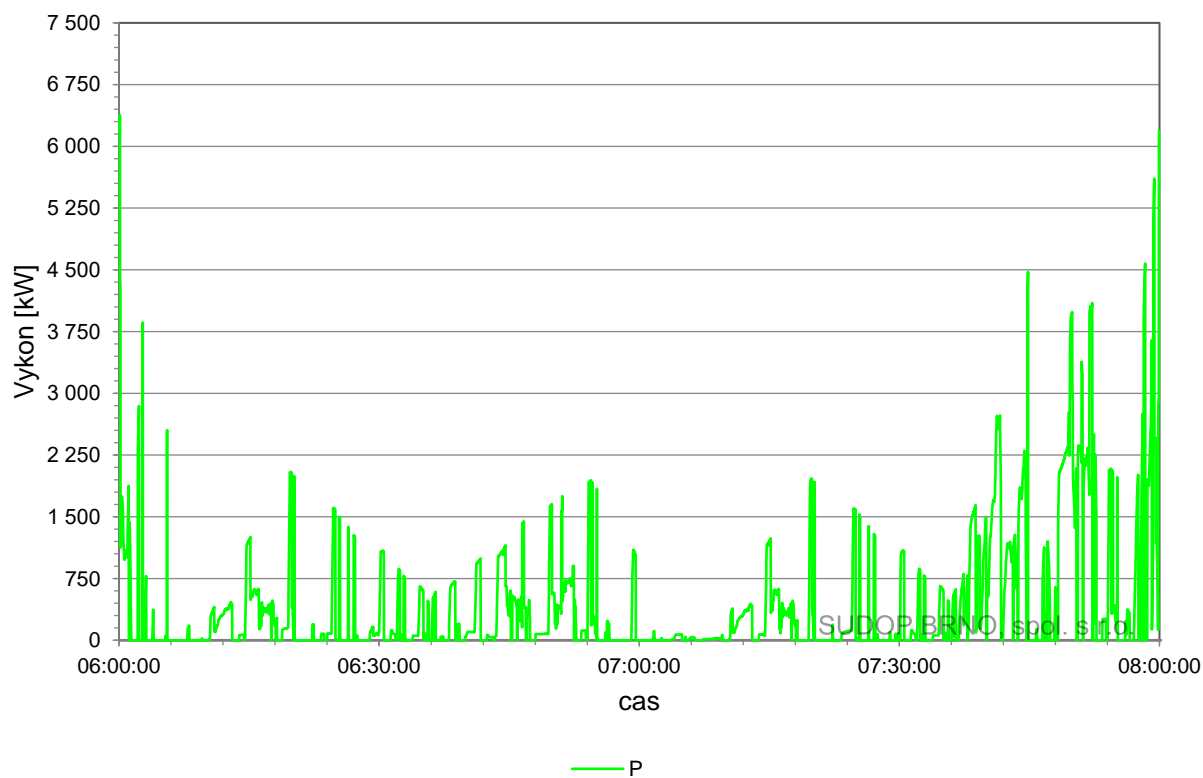
10 VÝKONOVÉ ZATÍŽENÍ TM 5



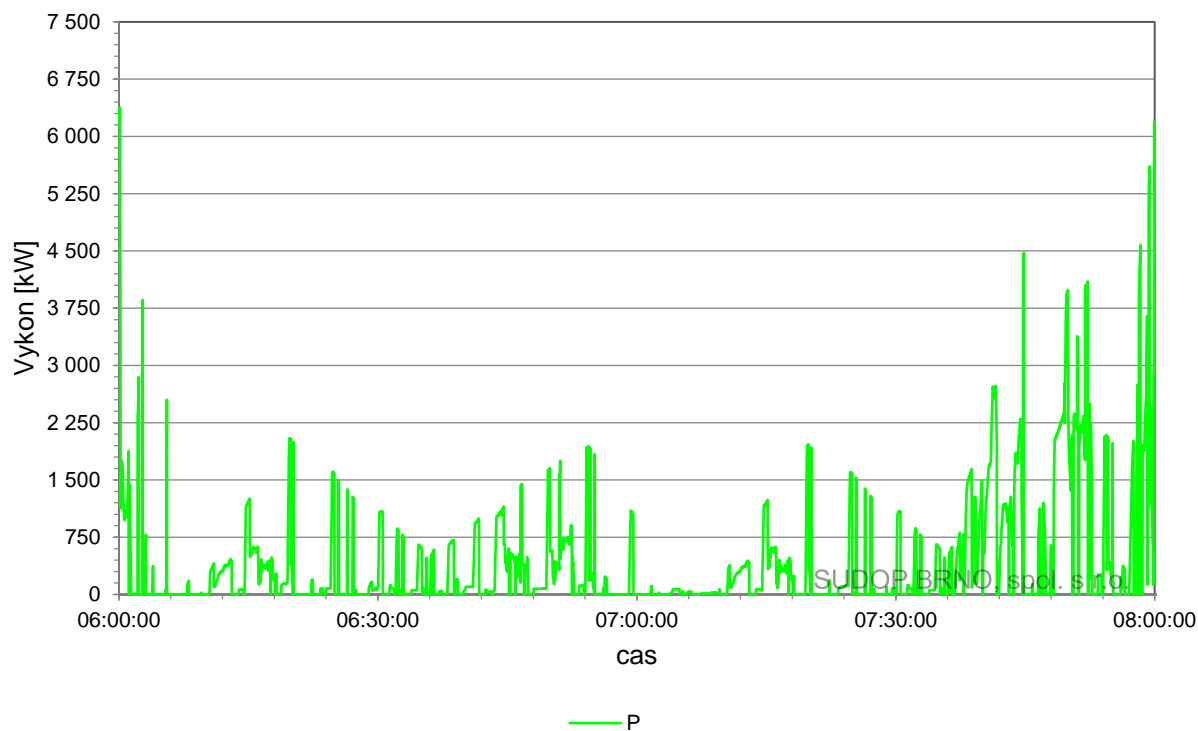
11 PRŮBĚH VÝKONU V ZÁVISLOSTI NA ČASE $P=F(T)$ – TM 1



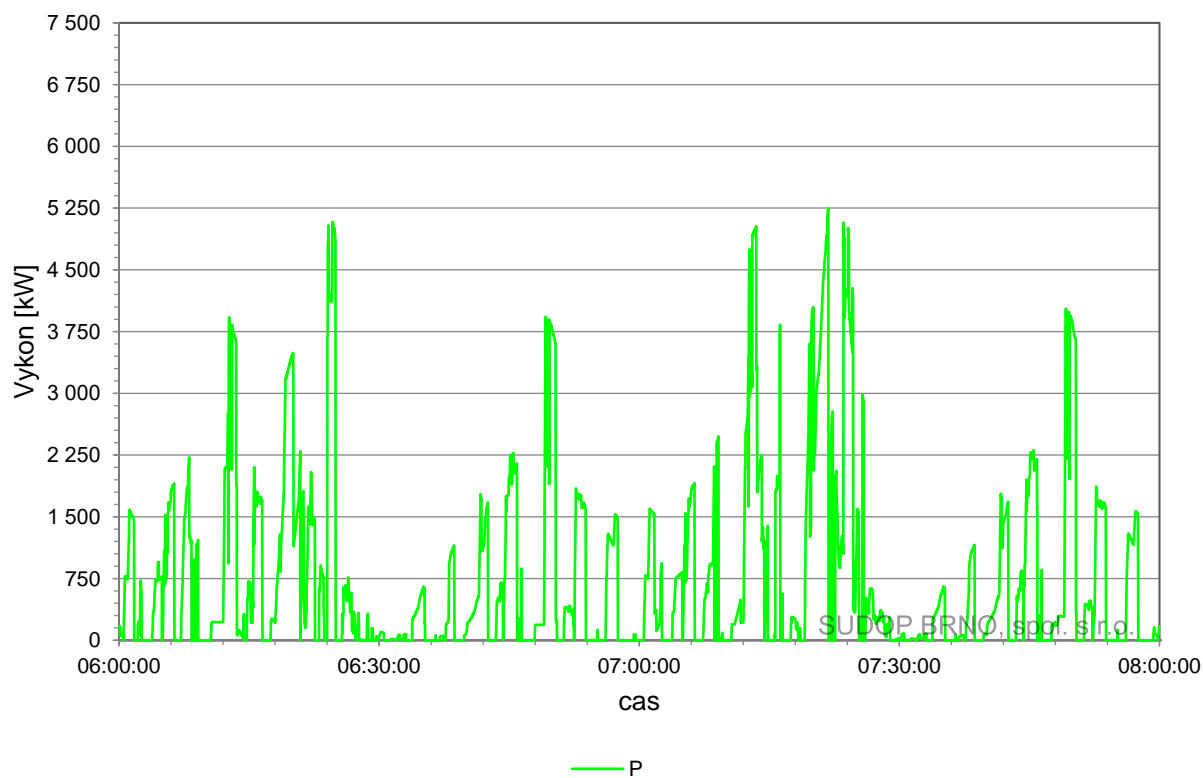
12 PRŮBĚH VÝKONU V ZÁVISLOSTI NA ČASE $P=F(T)$ – TM 2



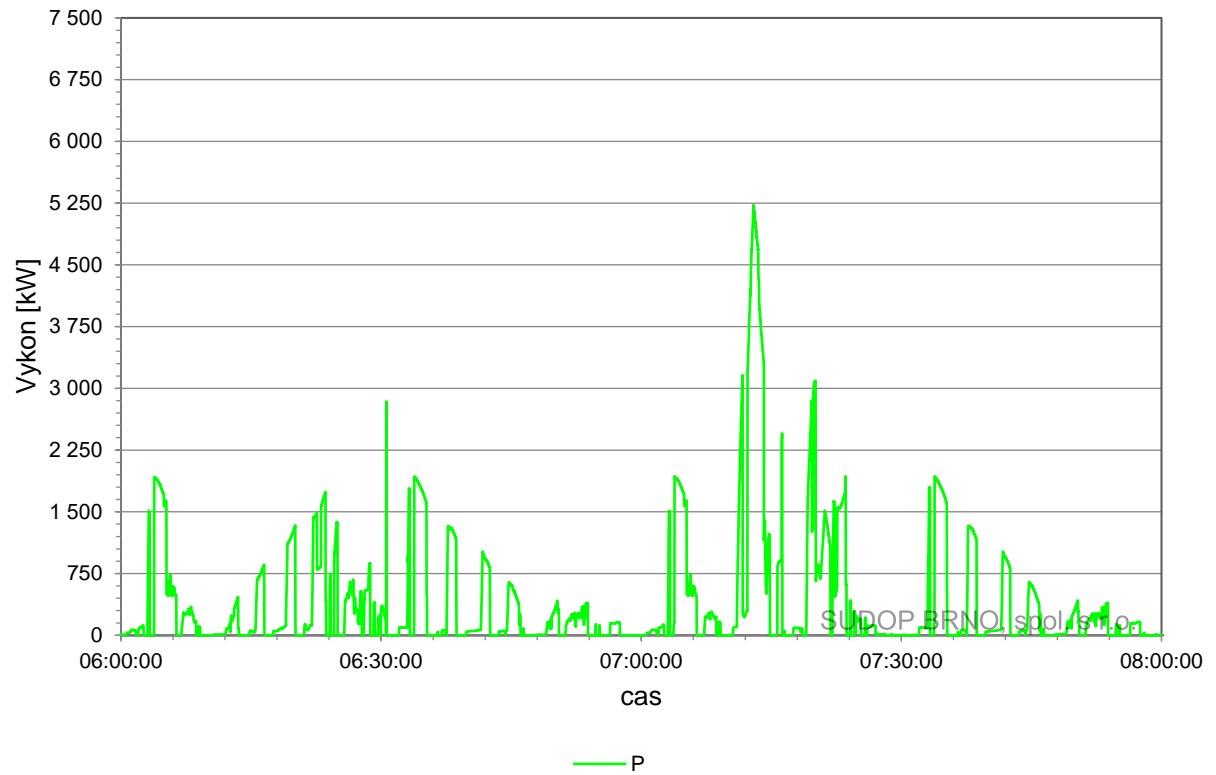
13 PRŮBĚH VÝKONU V ZÁVISLOSTI NA ČASE $P=F(T)$ – TM 3



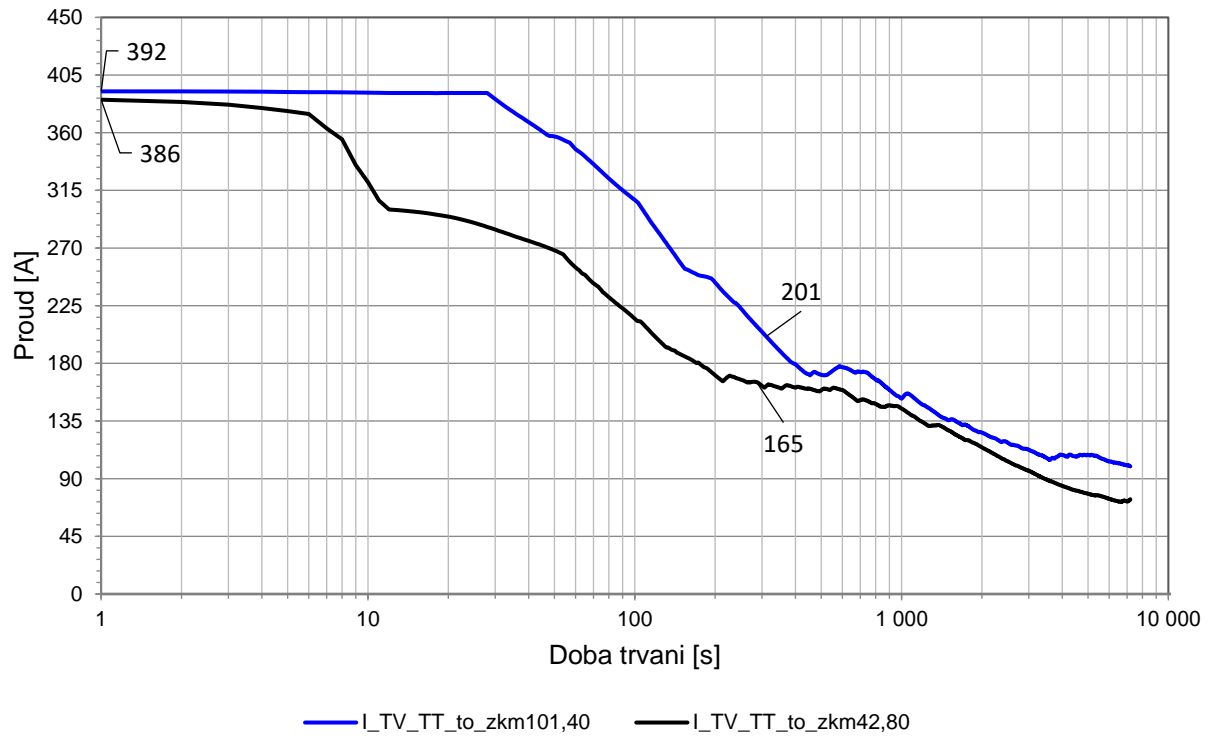
14 PRŮBĚH VÝKONU V ZÁVISLOSTI NA ČASE $P=F(T)$ – TM 4



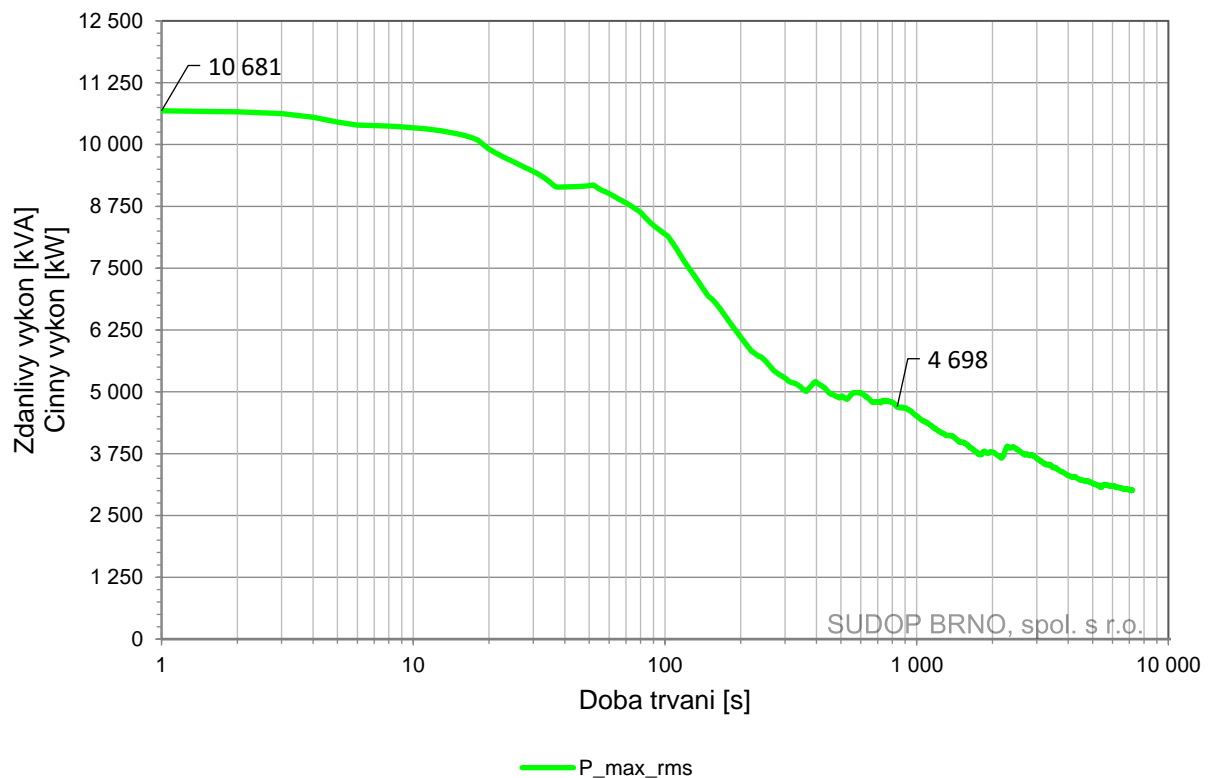
15 PRŮBĚH VÝKONU V ZÁVISLOSTI NA ČASE $P=F(T)$ – TM 5



16 PROUDOVÉ ZATÍŽENÍ TV - TT

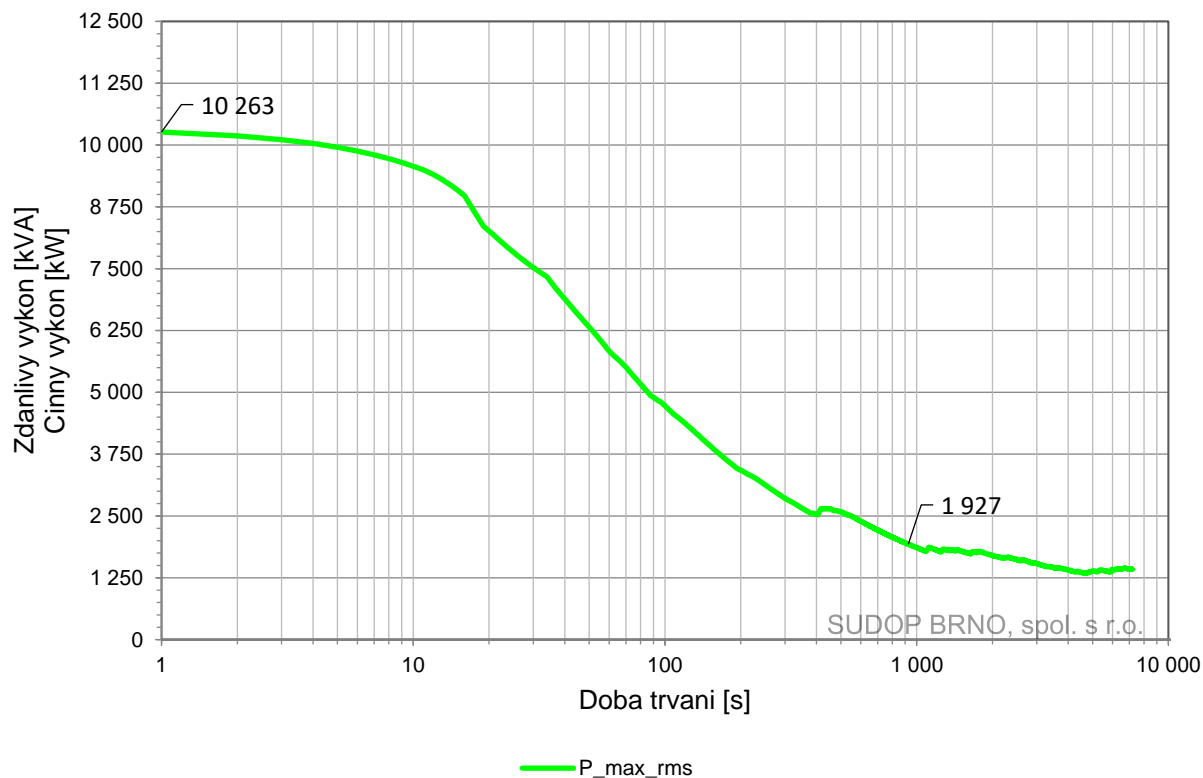


17 VÝKONOVÉ ZATÍŽENÍ TT – ODBĚR



SUDOP BRNO, spol. s r.o.

18 VÝKONOVÉ ZATÍŽENÍ TT – DODÁVKA



19 PRŮBĚH VÝKONU V ZÁVISLOSTI NA ČASE $P=F(T)$ – TT

