

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

Koncepční studie elektrifikace tratí v oblasti severovýchodních Čech

Bc. Lukáš Kulich

Diplomová práce

2021

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	<b>Bc. Lukáš Kulich</b>
Osobní číslo:	<b>D18504</b>
Studijní program:	<b>N3708 Dopravní inženýrství a spoje</b>
Studijní obor:	<b>Elektrotechnické a elektronické systémy v dopravě</b>
Téma práce:	<b>Koncepční studie elektrifikace tratí v oblasti severovýchodních Čech</b>
Zadávací katedra:	<b>Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě</b>

### Zásady pro vypracování

- Navrhněte rozmístění a dimenzování trakčních napájecích stanic 25 kV 50 Hz konvenční koncepce v oblasti severovýchodních Čech v kontextu s provozním zatížením tratí a s energetickou infrastrukturou.
- Porovnejte systémy napájení tratí v oblasti severovýchodních Čech pro případy použití konvenčních napájecích stanic a měničových napájecích stanic.
- Proveďte návrh rozmístění měničových napájecích stanic v oblasti severovýchodních Čech z hlediska délky napájených traťových úseků, provozního zatížení a zkratových poměrů.
- Navrhněte korekce konceptu rozmístění měničových napájecích stanic, uveďte zdůvodnění.

Rozsah pracovní zprávy: **dle zadání**  
Rozsah grafických prací: **dle zadání**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

**Seznam doporučené literatury:**

Doleček, R.: Napájení elektrických drah, studijní opora, Univerzita Pardubice, DFJP, 2012  
Doleček, R., Černý, O.: Trakční napájecí soustavy, studijní opora, Univerzita Pardubice, DFJP, 2014  
Hlava, K.: Elektromagnetická kompatibilita dráhových zařízení, skriptum, Univerzita Pardubice, DFJP, 2004

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Jaroslav Novák, CSc.**  
Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací  
techniky v dopravě

Datum zadání diplomové práce: **4. února 2021**  
Termín odevzdání diplomové práce: **17. května 2021**

L.S.

---

**doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.**  
děkan

---

**Ing. Dušan Čermák, Ph.D.**  
vedoucí katedry

## **Prohlášení autora**

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 23. 08. 2021

Bc. Lukáš Kulich

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce, panu prof. Ing. Jaroslavu Novákovi, CSc. za jeho čas, rady a poskytnuté materiály, které byly pro vyhotovení této práce nezbytné. Zároveň bych chtěl poděkovat celé své rodině za podporu během studia.

## **Anotace**

Tato diplomová práce se zabývá návrhem rozmístění a dimenzováním trakčních napájecích stanic 25 kV a 50 Hz konvenční koncepce v oblasti severních Čech v kontextu s provozním zatížením tratí a s energetickou infrastrukturou. Porovnává se zde provedení napájení tratí napájecími stanicemi klasické koncepce s provedením v, němž dojde k použití kombinace klasických napájecích stanic se stanicemi měničovými. Dále je zde vyhodnoceno chování napájecích stanic během zkratu na vedení a to, jak v případě nasazení jedné napájecí stanice, tak jejich kombinace vzhledem k závislosti na vzdálenosti zkratu od napájecí stanice. Závěr této práce porovnává výsledky obou konceptů.

## **Klíčová slova**

Trakční napájecí stanice, soustava 25 kV AC 50 Hz, zkrat

## **Title**

Electrification conceptual study of railway lines in northeastern Bohemia

## **Annotation**

This diploma thesis deals with the design of the layout and dimensioning of traction power stations 25 kV and 50 Hz of the conventional concept in the area of northern Bohemia in the context of the operational load of the lines and with the energy infrastructure. Here, the design of the supply of lines by power supply stations of the classical concept is compared with the design in which a combination of conventional power supply stations with converter stations is used. Furthermore, the behavior of power supply stations during a short circuit on the line is evaluated here, both in the case of deployment of one power supply station and their combination with respect to the dependence on the distance of the short circuit from the power supply station. The conclusion of this work compares the results of both concepts.

## **Keywords**

Traction power station, 25 kV AC 50 Hz system, short circuit

# Obsah

Úvod.....	1
1 Napájecí soustavy v ČR.....	2
1.1 Napájení drah ČD soustavou DC 3 kV.....	2
1.2 Napájení drah ČD soustavou 25 kV, 50 Hz AC.....	3
1.3 Důvod, proč je soustava 25 kV, 50 Hz AC perspektivnější, než 3 kV DC.....	4
2. Návrh rozmístění a dimenzování trakčních napájecích stanic 25 kV, 50 Hz konvenční koncepce v oblasti severovýchodních Čech v kontextu s provozním zatížením tratí a s energetickou infrastrukturou.....	5
2.1 Podrobnější charakteristika trakční soustavy 25 kV, 50 Hz AC klasické koncepce.....	5
2.2 Koncept elektrifikace tratí v severovýchodních Čechách na základě jejich provozního zatížením.....	7
2.3 Výpočet očekávané energetické a výkonové minimální náročnosti trati Nymburk – Mladá Boleslav.....	10
2.4 Výsledky očekávané energetické a výkonové minimální náročnosti vybraných tratí.....	13
2.5 Vytvoření schéma rozmístění napájecích stanic klasické koncepce.....	15
3. Porovnání systémů napájení tratí v oblasti severovýchodních Čech pro případy použití konvenčních napájecích stanic a měničových napájecích stanic v kombinaci s konvenčními.....	16
3.1 Podrobnější charakteristika trakční soustavy 25 kV, 50 Hz AC s použitím měničových napájecích stanic.....	16
3.2 Popis základních parametrů výpočetního modelu, který byl použit pro podrobnější analýzu.....	17
3.3 Porovnání výsledků analýzy modelů systémů napájení tratí v oblasti severovýchodních Čech pro případy použití konvenčních napájecích stanic a měničových napájecích stanic.....	20
4. Porovnání systémů napájecích stanic z hlediska zkratových poměrů.....	41
4.1 Zkrat při jednostranném napájení trati.....	41
4.2 Zkrat při spojitém napájení trati kombinací měničové a klasické napájecí stanice.....	46
Závěr.....	58
Použitá literatura.....	59
Seznam obrázků.....	60
Seznam tabulek.....	63
Seznam příloh (přílohy jsou na přiloženém CD).....	65

## Úvod

Tato diplomová práce slouží, jako koncepční studie elektrifikace vybraných tratí v oblasti severovýchodních Čech. Železniční síť v České republice má celkovou délku 9 496 km, přičemž elektrifikováno je 3 041 km, což je zhruba 32 %. Na našem území se v současnosti nacházejí dvě rozdílné trakční napájecí soustavy 3 kV DC a 25 kV, 50 Hz AC.

Na začátku této práce si řekneme základní parametry konvenční koncepce soustavy 25 kV, 50 Hz AC a proč je pro budoucí elektrifikaci vhodnější, než soustava 3 kV DC.

Na základě informací z práce [2] navrhne umístění a dimenzování trakčních napájecích stanic 25 kV 50 Hz konvenční koncepce v oblasti severovýchodních Čech v kontextu s provozním zatížením tratí a s energetickou infrastrukturou.

Porovnáme parametry systémů napájení tratí v oblasti severovýchodních Čech pro případy použití konvenčních napájecích stanic a kombinace konvenční napájecí stanice se stanicí měničového charakteru.

Dále prověříme chování napájecích stanic při zkratu v závislosti na vzdálenosti od napájecí stanice a to, jak při použití jednoho druhu napájecí stanice, tak při jejich kombinaci.

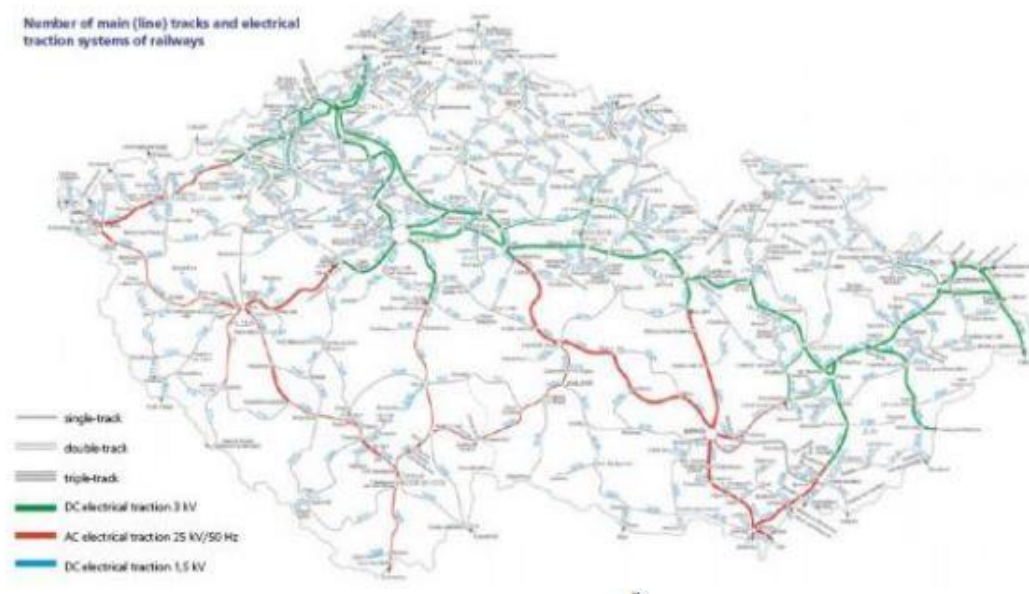
Tato práce by nám měla dát jistý návrh pro budoucí elektrifikaci a zároveň nám nastíní některé výhody i nevýhody při použití napájecích stanic vybavených statickým měničem.



# 1 Napájecí soustavy v ČR

Na našem území jsou tedy v současnosti provozovány dvě trakční napájecí soustavy rozdílného charakteru nesoucí různé výhody a nevýhody plynoucí z jejich parametrů. Tyto trakční napájecí soustavy jsou 3 kV DC a 25 kV, 50 Hz AC. Z celkových 3 041 km elektrifikovaných tratí je na našem území 1 733 km elektrifikováno v provedení soustavy 3 kV DC a 1 314 km v provedení soustavy 25 kV, 50 Hz AC.

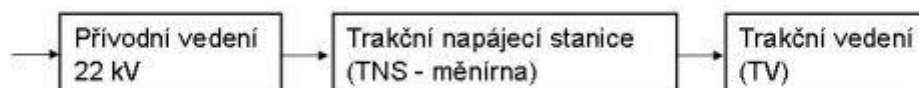
Pro lepší představu přikládám níže mapu elektrizace v České republice, kde je dle legendy zakresleno rozložení trakčních soustav na našem území.



Obrázek 1 Elektrifikace tratí v České republice. [5]

## 1.1 Napájení drah ČD soustavou DC 3 kV

### Schéma soustavy 3 kV DC



Obrázek 2 Blokové schéma soustavy 3 kV DC. [5]

### Vývoj soustavy 3 kV DC

Soustava 3 kV DC vznikla po dobré zkušenosti se soustavou 1,5 kV DC. Vzhledem k rostoucímu požadovanému výkonu  $P$  rostly prudce i nároky na trakční vedení, protože přímo úměrně s požadavkem na výkon rostl i požadavek na trakční proud  $I$  vzhledem k danému napětí  $U$ . Platí zde vztah:

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

Tato změna velikosti napětí z 1,5 kV DC na 3 kV DC měla za následek zmenšení trakčního proudu **I** na polovinu a umožnila společně s dalšími výhodami přežití této soustavy až do dnešního dne.

### Výhody a nevýhody soustavy 3 kV DC

#### Výhody:

- ✓ Menší proud v trakčním vedení v porovnání se soustavou 1,5 kV DC.
- ✓ Možnost oboustranného napájení trakčního vedení DC.
- ✓ Možnost napájení z vedení vysokého napětí 22 kV nebo 35 kV.
- ✓ Souměrný odběr z distribuční sítě VN (souměrné zatížení fází).

#### Nevýhody:

- Větší proud v trakčním vedení v porovnání se soustavou 25 kV, 50 Hz AC.
- Obtížné zhášení elektrického oblouku.
- Výrazně větší ztráty na trakčním vedení ve srovnání se soustavou 25 kV 50 Hz.
- Nižší přenosová schopnost ve srovnání se soustavou 25 kV 50 Hz.

## 1.2 Napájení drah ČD soustavou 25 kV, 50 Hz AC

### Schéma soustavy 25 kV, 50 Hz AC



Obrázek 3 Blokové schéma soustavy 25 kV, 50 Hz AC [5]

### Vývoj soustavy 25 kV, 50 Hz AC

Soustava 25 kV, 50 Hz AC se vyvinula v 50. letech ve Francii a postupně se rozšířila i do ČR. Tato soustava byla spjata s novým konceptem lokomotiv, kde je lokomotiva vybavena usměrňovačem (tehdy rtuťovým) a stejnosměrnými trakčními motory.

### Výhody a nevýhody soustavy 25 kV, 50 Hz AC

#### Výhody:

- ✓ Při dobře zvolené koncepci lokomotiv jednoduché trakční napájecí stanice (TNS).
- ✓ Větší vzdálenosti napájecích stanic.
- ✓ Menší vodivý průřez TV.

#### Nevýhody:

- Při nevhodně volené koncepci lokomotiv nutnost zlepšení účinnku a filtrace harmonických.
- Potíže s nesymetrickým odběrem trakční energie.

### **1.3 Důvod, proč je soustava 25 kV, 50 Hz AC perspektivnější, než 3 kV DC**

#### **Obecně platí pro všechny trakční proudové soustavy**

Výkon, který může daná soustava přenášet, je při zadané délce napájeného úseku úměrný napětí a nepřímo úměrný podélné impedanci v přívodním vedení.

Máme-li tedy zvýšit přenosovou schopnost trakčního vedení, naskýtají se dvě cesty:

1. Buď zvýšit napětí, kterým je trakční výkon přenášen od napájecí stanice k hnacímu vozidlu.
2. Nebo zmenšit měrnou hodnotu podélné impedance TV.

Vzhledem k faktu nárůstu zatížení tratí nelze ignorovat výhody plynoucí z rozvoje soustavy využívající vyšší napětí (cca.8x vyšší). Tedy je třeba zaměřit se na další rozvoj soustavy 25 kV, 50 Hz AC. Detailnějším rozborem této problematiky a porovnáním obou proudových soustav se zabývá zdroj [4].

## **2. Návrh rozmístění a dimenzování trakčních napájecích stanic 25 kV, 50 Hz konvenční koncepce v oblasti severovýchodních Čech v kontextu s provozním zatížením tratí a s energetickou infrastrukturou.**

### **2.1 Podrobnější charakteristika trakční soustavy 25 kV, 50 Hz AC klasické koncepce**

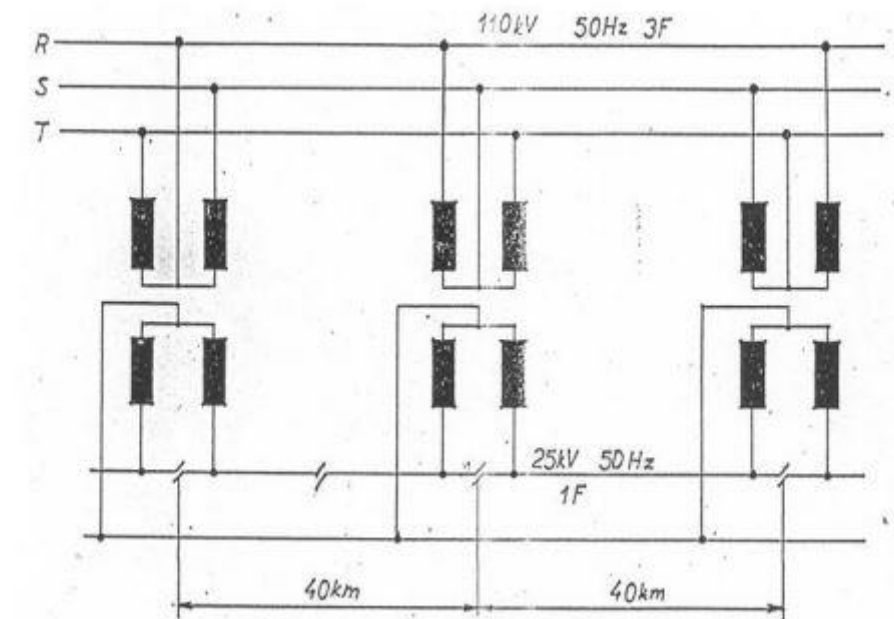
Jedná se o AC jednofázovou napájecí soustavu pro železniční dopravu, rozšířenou především ve Francii, Belgii, Velké Británii, Portugalsku, Finsku, Dánsku, Maďarsku, Rumunsku, Bulharsku, Řecku, zemích bývalé Jugoslávie, Slovensku a v České republice. V ČR představuje v současnosti cca 42 % elektrizovaných tratí a pokrývá jižní část území, obrázek 1. Na rozdíl od DC trakce je AC trakce provozována výhradně jako paprsková. Oboustranné napájení není možné z důvodu nežádoucích přetoků vyrovnávacích proudů mezi napájecími stanicemi. Z každé trakční napájecí stanice je napájeno trakční vedení až po spínací stanici, která umožňuje napájený úsek prodloužit v případě poruchy nebo výluky jedné ze sousedních trakčních napájecích stanic. Napájecí stanice má vždy pro každou kolej v každém směru samostatný vývod. Ve spínací stanici jsou obě stopy v jednom směru obvykle příčně propojeny pro zmenšení úbytků napětí. [4]

#### **Řízení vedení 110 kV (rozvodna 110 kV)**

Rozvodna 110 kV, ke které je napájecí stanice připojena, je standardně vybavena běžnými vstupními vypínači a přípojnými 110 kV v trojfázovém provedení, jenom vývodové vypínače pro trakční transformátor jsou dvofázové (nebo dva jednofázové). Volba použitého sdruženého napětí sítě 110 kV je předmětem dohody s dodavatelem elektrické energie. Na rozdíl od měření soustavy DC 3 kV, jejichž technologie je od země plně izolována až po vývody záporného napětí ke kolejnicím, je jeden sekundární pól trakčního transformátoru galvanicky propojen se „zeleno-žlutou“ zemí a dále s kolejnicemi. Z tohoto důvodu vznikají obtíže při provozu napájecích stanic společných pro 3 kV a 25 kV, 50 Hz, pokud mají společné zemnicí soustavy. Původně stavěné rozvodny 110 kV byly venkovního typu. To vedlo k záboru značné plochy půdy a ke značným nákladům na provoz a údržbu technologického zařízení. V poslední době v několika případech díky stísněným prostorovým poměrům jsou instalovány rozvodny 110 kV tzv. zapouzdřeného typu. [4]

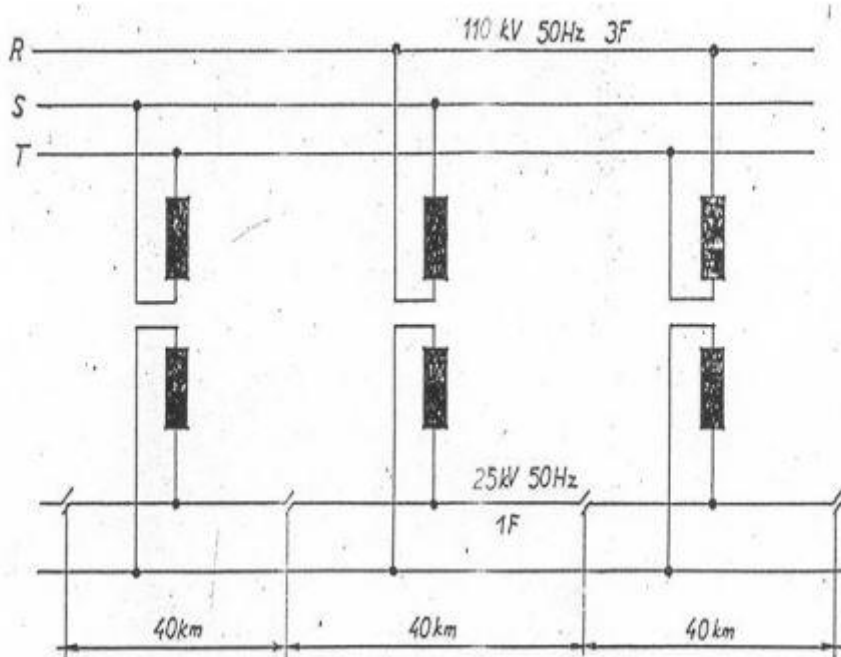
#### **Technické řešení napájecí stanice (konvenční koncepce)**

Nedílnou součástí napájecí stanice je trakční transformovna, v níž je umístěn trakční transformátor 110/27 kV, 50 Hz u ČD jednotného typu 10/12,5 MVA. Vzhledem k tomu, že napětí v síti 110 kV se pohybuje v značně širokých mezích jsou všechny trakční transformátory vybaveny širokou možností regulace napětí na straně vysokého napětí. Touto regulací lze udržovat konstantní napětí na výstupu z napájecí stanice, a to samočinně pomocí napěťového relé **HRT**. Trakční transformátor je jednofázový, připojený mezi dohodnuté fázové vodiče sdruženého napětí sítě 110 kV. Každá napájecí stanice má instalovanou vždy dvojici trakčních transformátorů, které jsou obvykle připojeny na dvě rozdílná sdružená napětí sítě 110 kV. Pokud jsou oba transformátory v provozu, vzniká napájení do „V“. Tento druh napájení má výhodu v tom, že síť 110 kV je zatěžována rovnoměrněji. Důležitou podmínkou je skutečnost, že transformátor v sousední stanici bude připojen na totéž sdružené napětí, aby na trakčním vedení v místě výměny fází nedocházelo ke vzniku nadměrného podélného napětí.



Obrázek 4 Zapojení transformátorů do "V"[5]

Pokud je trakční odběr nízký, je použit jen jeden trakční transformátor, který napájí obě strany tratě. Takovému zapojení se říká zapojení do „T“.



Obrázek 5 Zapojení transformátorů do „T“ [5]

### Filtračně kompenzační zařízení (FKZ)

Filtračně kompenzační zařízení zajišťuje:

- 1) Plynulou a rychlou regulaci jalového výkonu.
- 2) Filtrace vyšších harmonických složek
- 3) Možnost individuálního řízení každé fáze zvláště při požadavku odstranění nesymetrie sítě.

Filtračně kompenzační zařízení zajišťuje optimalizaci odběru elektrické energie pomocí dynamických kompenzátorů. Filtrace vyšších harmonických složek je tvořena sériovou kombinací kondenzátorů a filtrační tlumivky. Ty fungují jako sériové rezonanční obvody pro odstranění nežádoucích vyšších harmonických kmitočtů, hlavně 3., 5., a 7.harmonické.

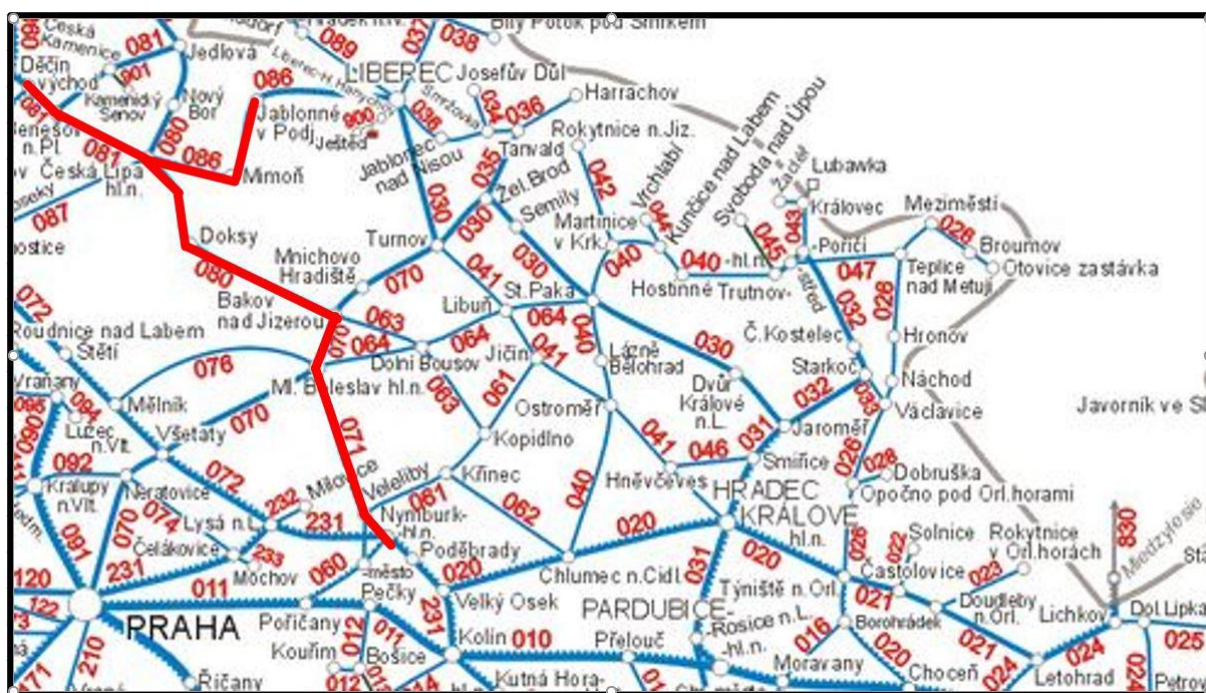
**Na nově budovaných tratích význam FKZ klesá z důvodu využití moderních vozů, se čtyř kvadrantovými pulzně-šířkovými měniči.**

### Trakční vedení

Slouží k přívodu elektrického proudu do kolejových vozidel. Ve většině případů je tvořeno jedním, nebo dvěma vodiči, obvykle měděnými dráty, které jsou zavěšeny ve stanovené poloze nad jízdní dráhou. Vozidlo udržuje kontakt s trolejovým vedením prostřednictvím sběrače, či sběračů proudu.

## 2.2 Koncept elektrifikace tratí v severovýchodních Čechách na základě jejich provozního zatížení

Pro návrh budoucí elektrifikace byly vybrány tratě znázorněné níže, které by měly velký potenciál z hlediska využití při budoucí elektrifikaci. Pro budoucí elektrifikaci je vybrán i úsek Bakov n. J. - Liberec, zde se však pravděpodobně bude jednat o zcela novou trať, jejíž parametry nejsou nyní známy, a proto není tento úsek v práci uvažován.



Obrázek 6 Výběr traťových úseků pro budoucí elektrifikaci

## Odhadovaný nárůst energetické náročnosti tratí po elektrifikaci

Uvažujeme, že po elektrifikaci vybraných tratí vzroste energetická náročnost následujícím způsobem:

- 1) Nymburk – Mladá Boleslav - 1,5 x aktuální energetická náročnost
- 2) Mladá Boleslav – Bakov nad Jizerou – 2,2 x aktuální energetická náročnost
- 3) Bakov nad Jizerou – Česká Lípa – 2,2 x aktuální energetická náročnost
- 4) Česká Lípa – Jablonné v Podještědí – 2,2 x aktuální energetická náročnost
- 5) Česká Lípa – Benešov nad Ploučnicí – 2,2 x aktuální energetická náročnost
- 6) Benešov nad Ploučnicí – Děčín Východ – 2,2 x aktuální energetická náročnost

### Postup výpočtu odhadované minimální energetické náročnosti tratí

Pokud jde o minimální energetickou náročnost z pohledu celkové energie spotřebované za den provozu dané trati lze ji spočítat na základě vytvořené tabulky, kde nalezneme celkové množství vlaků provozovaných na dané trati. V rámci této práce uvažujeme pouze vlaky osobní a nákladní dopravy.

Trať 071 / 541 Nymburk - Mladá Boleslav													
Traťový úsek	Délka [km]	Referenční místo	Os	Ex	Sv	N	NEx	N-pp	Lv	Ruš			Celkem
Nymburk - Mladá Boleslav	30	Dobrovice	20	16	0	29	8	0	0	0	11		73 vlaků
	Hmotnost [t]		50	80	0	500	1000	0	0	0			mOs_celk 2280 [t]
													mN_celk 14500 [t]
													m_celk 16780 [t]
													do_prace 503400 [t*km]

Tabulka 1 Přehledová tabulka provozovaných vlaků

Vzhledem k různorodosti druhů a hmotnosti vlaků uvažujeme průměrné hodnoty hmotnosti vlaků viz. **Přehledová tabulka provozovaných vlaků**. Dále bylo nezbytné stanovit vhodnou rovnici jízdních odporů podle, které bychom následně počítali energetickou náročnost jízdy vlaku vzhledem k zvolené hmotnosti.

Pro tyto účely jsme zvolili typ jízdního odporu **S**, jenž se užívá, jak pro osobní, tak nákladní vozy viz. **Tabulka jízdních odporů**.

TYP JÍZDNÍHO ODPORU:	UŽÍVÁ SE PRO:	ROVNICE:
<b>R</b>	osobní čtyřnápravové vozy	$o_j = 1,35 + 0,0008 \cdot V + 0,00033 \cdot V^2$
<b>S</b>	osobní a nákladní vozy	$o_j = 1,9 + 0,000465 \cdot V^2$
<b>M<sub>4</sub></b>	osobní čtyřnápravové vozy lehké stavby	$o_j = 1,8 + 0,01 \cdot V + 0,000476 \cdot V^2$
<b>M<sub>2</sub></b>	osobní dvounápravové vozy lehké stavby	$o_j = 1,5 + 0,00089 \cdot V^2$
<b>U<sub>2</sub></b>	prázdné dvounápravové nákladní vozy	$o_j = 2,0 + 0,00125 \cdot V^2$
<b>U<sub>4</sub></b>	prázdné čtyřnápravové nákladní vozy	$o_j = 2,0 + 0,0008 \cdot V^2$
<b>T<sub>2</sub></b>	ložené dvounápravové nákladní vozy	$o_j = 1,7 + 0,0033 \cdot V + 0,00018 \cdot V^2$
<b>T<sub>4</sub></b>	ložené čtyřnápravové nákladní vozy	$o_j = 1,3 + 0,00033 \cdot V^2$

Tabulka 2 Tabulka jízdních odporů [7]

V této práci bude názorně ukázán pouze výpočet pro trať Nymburk – Mladá Boleslav vzhledem ke skutečnosti, že tyto výpočty byly již provedeny v rámci práce [2]. Níže pak již budou uvedeny pouze přehledové tabulky provozovaných vlaků a tabulky s výsledky pro dané tratě.

**Součinitel jízdního odporu se rovná obecně:**

$$o_j = a + b \cdot v + c \cdot v^2 \quad (2)$$

**Popis jednotlivých složek:**

**a** – je absolutní složka, nezávislá na rychlosti vlaku (valivé tření mezi kolem a kolejnicí, tření v ložiskách...)

**b** – je lineární složka, závislá na první mocnině rychlosti vlaku (viskózní tření o vzduch)

**c** – je kvadratická složka, závislá na druhé mocnině rychlosti vlaku (aerodynamický odpor vzduchu)

**Jízdní odpor se spočítá:**

$$O_j = o_j \cdot m_v \cdot g \quad (3)$$

**m<sub>v</sub>** – hmotnost vozů v tunách

**g** – gravitační zrychlení 9,81 m/s<sup>2</sup>

**Odpor ze stoupání:**

$$O_s = m_v \cdot g \cdot \sin \alpha = m_v \cdot g \cdot \frac{s}{1000} \quad (4)$$

**m<sub>v</sub>** – hmotnost vozů v kilogramech

**g** – gravitační zrychlení 9,81 m/s<sup>2</sup>

**s** – stoupání tratě v promilích

**Výkon potřebný na jízdu konstantní rychlostí:**

$$P_K = (O_j + O_s) \cdot v \quad (5)$$

**Výkon potřebný ke zrychlení je dán:**

$$P_a = (m + m_{rk}) \cdot a \cdot v \quad (6)$$

Tento výkon je dán hmotností vozidla **m**, zrychlením **a**, rychlostí **v**, ale také redukovanou hmotností **m<sub>rk</sub>**, která respektuje setrvačné hmoty akumulující kinetickou energii ve formě rotačního pohybu. Vzhledem k relativně malé velikosti **m<sub>rk</sub>** vůči **m** je tato veličina zanedbána a je uvažována mechanická setrvačnost daná pouze hmotností vozidla **m**.

Potom je výkon potřebný ke zrychlení dán:

$$P_a = m \cdot a \cdot v \quad (7)$$

**Energetická náročnost cesty vlaku:**

$$E = (P_K \cdot \frac{s}{v}) + (E_a \cdot N) \quad (8)$$

**s** – dráha (délka traťového úseku)

**v** – rychlost vlaku

**E<sub>a</sub>** – energie potřebná ke zrychlení vlaku na požadovanou rychlost (zrychlování) [3]

**N** – počet rozjezdů (zrychlování)

Vzorec **8** je zde v této práci uvažován pouze pro konstantní (střední) rychlost.



## 2.3 Výpočet očekávané energetické a výkonové minimální náročnosti trati Nymburk – Mladá Boleslav

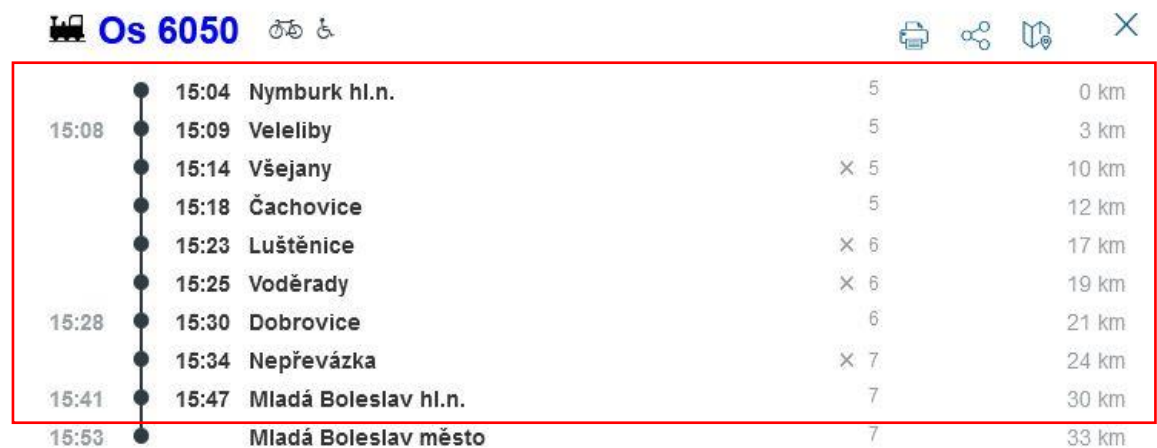
Počty vlaků a délka trati odpovídají tabulce níže:

Trať 071 / 541 Nymburk - Mladá Boleslav												
Traťový úsek	Délka [km]	Referenční místo	Os	Ex	Sv	N	NEx	N-pp	Lv	Ruš		Celkem
Nymburk - Mladá Boleslav	30	Dobrovice	20	16	0	29	8	0	0	11		73 vlaků
	Hmotnost [t]		50	80	0	500	1000	0	0	0	mOs_celk	2280 [t]
											mN_celk	14500 [t]
											m_celk	16780 [t]
											do_prace	503400 [t*km]

Tabulka 3 Přehledová tabulka provozovaných vlaků Nymburk-Mladá Boleslav

### Energetická/výkonová náročnost cesty jednotlivých typů vlaků:

Počet zastávek zjištěn ze zdroje [8] a výpočet energie na rozjezd vlaku Os [3].



Obrázek 7 Plán jízdy vlaku Os 6050 na lince S31 [8]

Energetická/výkonová náročnost cesty vlaku Os	
Výkon na krytí jízdních odporů bez převýšení (40 km/h) [w]	14409,8
Výkon na krytí jízdních odporů bez převýšení (80 km/h) [w]	53148,4
Výkon potřebný na krytí odporu ze stoupání [w]	6540
Výkon na krytí jízdních odporů se sklonem 1,2‰ (40 km/h) [w]	20949,8
Výkon na krytí jízdních odporů se sklonem 1,2‰ (80 km/h) [w]	59688,4
Energie potřebná na cestu jednoho Os vlaku [w•s]	83981136,73
Energie potřebná na cestu jednoho Os vlaku [kw•h]	23,328

Tabulka 4 Energetická/výkonová náročnost cesty osobního vlaku [2]

15:45	Kolín	6	0 km
15:57	Poděbrady	6	16 km
16:07	<b>16:08 Nymburk hl.n.</b>	5	23 km
16:33	<b>16:37 Mladá Boleslav hl.n.</b>	7	53 km
16:46	Bakov n.Jizerou	8	62 km
16:56	Bělá p.Bezdězem	8	72 km
17:05	Bezděz	9, 2220	81 km
17:15	Doksy	2201	92 km
17:18	Staré Splavy	2207	94 km
17:32	Česká Lípa hl.n.	2001	107 km
17:42	Česká Lípa střelnice	2001	109 km
17:56	Nový Bor	4001	119 km
18:03	Svor	2306	124 km
18:14	Jedlová	2367	132 km
	18:27 Rybníště	363	141 km
	Rybníště, 12 min.		
	18:32 Krásná Lípa	386	146 km
18:38	Rumburk	381	152 km

Obrázek 8 Plán jízdy vlaku R6 1194 na lince R22 [8]

Energetická/výkonová náročnost cesty vlaku Ex	
Výkon na krytí jízdních odporů bez převýšení (40 km/h) [w]	23055,68
Výkon na krytí jízdních odporů bez převýšení (80 km/h) [w]	85037,44
Výkon potřebný na krytí odporu ze stoupání [w]	10464
Výkon na krytí jízdních odporů se sklonem 1,2‰ (40 km/h) [w]	33519,68
Výkon na krytí jízdních odporů se sklonem 1,2‰ (80 km/h) [w]	95501,44
Energie potřebná na cestu jednoho Ex vlaku [w•s]	95803122,73
Energie potřebná na cestu jednoho Ex vlaku [kw•h]	26,612

Tabulka 5 Energetická/výkonová náročnost cesty expresního vlaku [2]

Vzhledem k neznámému plánu jízdy nákladních vlaků započítán rozjezd pouze na počátku cesty.

Energetická/výkonová náročnost cesty vlaku N	
Výkon na krytí jízdních odporů bez převýšení (40 km/h) [w]	144098
Výkon na krytí jízdních odporů bez převýšení (80 km/h) [w]	531484
Výkon potřebný na krytí odporu ze stoupání [w]	65400
Výkon na krytí jízdních odporů se sklonem 1,2‰ (40 km/h) [w]	209498
Výkon na krytí jízdních odporů se sklonem 1,2‰ (80 km/h) [w]	596884
Energie potřebná na cestu jednoho N vlaku [w•s]	599191076,8
Energie potřebná na cestu jednoho N vlaku [kw•h]	166,442

Tabulka 6 Energetická/výkonová náročnost cesty nákladního vlaku [2]

Energetická/výkonová náročnost cesty vlaku NEx	
Výkon na krytí jízdních odporů bez převýšení (40 km/h) [w]	288196
Výkon na krytí jízdních odporů bez převýšení (80 km/h) [w]	1062968
Výkon potřebný na krytí odporu ze stoupání [w]	130800
Výkon na krytí jízdních odporů se sklonem 1,2‰ (40 km/h) [w]	418996
Výkon na krytí jízdních odporů se sklonem 1,2‰ (80 km/h) [w]	1193768
Energie potřebná na cestu jednoho NEx vlaku [w•s]	1200340650
Energie potřebná na cestu jednoho NEx vlaku [kw•h]	333,428

Tabulka 7 Energetická/výkonová náročnost cesty expresního nákladního vlaku [2]

Celková energie je spočtena jako součin potřebné energie jedné cesty vlaku daného typu a počtu vlaků, jenž jsou provozovány během jednoho dne. Očekávaná energie je celková energie vynásobená konstantou 1,5. Konstanta 1,5 respektuje plánované navýšení množství vlaků a jejich vyšší hmotnost.

Energetická náročnost vlaků osobní dopravy	
Energetická náročnost vlaků Os [kw•h/den]	466,56
Energetická náročnost vlaků Ex [kw•h/den]	425,792
Celková energetická náročnost vlaků osobní dopravy [kw•h/den]	892,352
Očekávaná energetická náročnost vlaků Os [kw•h/den]	699,84
Očekávaná energetická náročnost vlaků Ex [kw•h/den]	638,688
Celková očekávaná energetická náročnost vlaků osobní dopravy [kw•h/den]	1338,528

Tabulka 8 Energetická náročnost vlaků osobní dopravy Nymburk – Mladá Boleslav [2]

Energetická náročnost vlaků nákladní dopravy	
Energetická náročnost vlaků N [kw•h/den]	4826,818
Energetická náročnost vlaků NEx [kw•h/den]	2667,424
Celková energetická náročnost vlaků nákladní dopravy [kw•h/den]	7494,242
Očekávaná energetická náročnost vlaků N [kw•h/den]	7240,227
Očekávaná energetická náročnost vlaků NEx [kw•h/den]	4001,136
Celková očekávaná energetická náročnost vlaků nákladní dopravy [kw•h/den]	11241,363

Tabulka 9 Energetická náročnost vlaků nákladní dopravy Nymburk – Mladá Boleslav [2]

### Minimální výkonová náročnost ve všední den v časovém rozpětí 15:00 a 17:00:

Střední hodnota celkové výkonové náročnosti je dána počtem vlaků osobní dopravy v úseku ve zvoleném časovém rozpětí a příspěvkem nákladní dopravy spočteným jako počet vlaků za den vydělený počtem hodin dne. Špičková hodnota je uvažována jako trojnásobek střední hodnoty.

Výkonová náročnost vlaků na trati mezi 15:00 a 17:00		
	střední hodnota	špičková hodnota
Celková výkonová náročnost vlaků osobní a nákladní dopravy Nymburk - Mladá Boleslav [Mw]	0,524162125	1,572486375

Tabulka 10 Výkonová náročnost vlaků na trati mezi 15:00 a 17:00 [2]

## 2.4 Výsledky očekávané energetické a výkonové minimální náročnosti vybraných tratí

Počty vlaků a délky tratí odpovídají tabulkám níže:

Traťový úsek	Délka [km]	Referenční místo	Os	Ex	Sv	N	NEx	N-pp	Lv	Ruš		Celkem	
Mladá Boleslav - Bakov nad Jizerou	9	Mladá Boleslav - Debř	41	33	0	8	1	0	2	11		85	vlaků
	Hmotnost [t]		50	120	0	500	1000	0	80	0	mOs_celk	6010	[t]
											mN_celk	5000	[t]
											m_celk	11010	[t]
											do_prace	99090	[t*km]

Tabulka 11 Přehledová tabulka provozovaných vlaků Mladá Boleslav-Bakov nad Jizerou

Traťový úsek	Délka [km]	Referenční místo	Os	Ex	Sv	N	NEx	N-pp	Lv	Ruš		Celkem	
Bakov nad Jizerou - Česká Lípa	45	Staré Splavy z.	23	15	1	6	2	0	0	0		47	vlaků
	Hmotnost [t]		50	120	50	500	1000	0	80	1	mOs_celk	3000	[t]
											mN_celk	5000	[t]
											m_celk	8000	[t]
											do_prace	36000	[t*km]

Tabulka 12 Přehledová tabulka provozovaných vlaků Bakov nad Jizerou-Česká Lípa

Traťový úsek	Délka [km]	Referenční místo	Os	Ex	Sv	N	NEx	N-pp	Lv	Ruš		Celkem	
Česká Lípa, hl.n. - Jablonné v Podještědí	28	Zdislava z.	27	18	1	4	0	0	0	0		50	vlaků
	Hmotnost [t]		50	120	50	500	0	0	0	0	mOs_celk	3560	[t]
											mN_celk	2000	[t]
											m_celk	5560	[t]
											do_prace	155680	[t*km]

Tabulka 13 Přehledová tabulka provozovaných vlaků Česká Lípa-Jablonné v Podještědí

Traťový úsek	Délka [km]	Referenční místo	Os	Ex	Sv	N	NEx	N-pp	Lv	Ruš		Celkem	
Česká Lípa, hl.n. - Benešov nad Ploučnicí	20	Zandov z.	20	18	0	0	0	0	0	2		38	vlaků
	Hmotnost [t]		50	120	0	0	0	0	0	0	mOs_celk	3160	[t]
											mN_celk	0	[t]
											m_celk	3160	[t]
											do_prace	63200	[t*km]

Tabulka 14 Přehledová tabulka provozovaných vlaků Česká Lípa-Benešov nad Ploučnicí

Traťový úsek	Délka [km]	Referenční místo	Os	Ex	Sv	N	NEx	N-pp	Lv	Ruš		Celkem	
Benešov nad Ploučnicí - Děčín Východ	8	Březiny u Děčína z.	52	21	0	6	0	0	0	4		79	vlaků
	Hmotnost [t]		50	120	50	500	0	0	0	0	mOs_celk	5120	[t]
											mN_celk	3000	[t]
											m_celk	8120	[t]
											do_prace	64960	[t*km]

Tabulka 15 Přehledová tabulka provozovaných vlaků Benešov nad Ploučnicí-Děčín Východ

Z přehledových tabulek provozovaných vlaků na daných tratích byly zpracovány následující přehledové tabulky energetických náročností a výkonové náročnosti vlaků:

Přehledová tabulka předpokládaných energetických náročností vlaků osobní dopavy	
Celková očekávaná energetická náročnost vlaků osobní dopavy Nymburk - Mladá Boleslav [kw•h/den]	1338,528
Celková očekávaná energetická náročnost vlaků osobní dopavy Mladá Boleslav - Bakov nad Jizerou [kw•h/den]	1493,061
Celková očekávaná energetická náročnost vlaků osobní dopavy Bakov nad Jizerou - Česká Lípa [kw•h/den]	3095,063
Celková očekávaná energetická náročnost vlaků osobní dopavy Česká Lípa, hl.n. - Jablonné v Podještědí [kw•h/den]	2142,017
Celková očekávaná energetická náročnost vlaků osobní dopavy Česká Lípa, hl.n. - Benešov nad Ploučnicí [kw•h/den]	1423,528
Celková očekávaná energetická náročnost vlaků osobní dopavy Benešov nad Ploučnicí - Děčín Východ [kw•h/den]	1104,76

Tabulka 16 Přehledová tabulka předpokládaných energetických náročností vlaků osobní dopavy [2]

Přehledová tabulka předpokládaných energetických náročností vlaků nákladní dopavy	
Celková očekávaná energetická náročnost vlaků nákladní dopavy Nymburk - Mladá Boleslav [kw•h/den]	11241,363
Celková očekávaná energetická náročnost vlaků nákladní dopavy Mladá Boleslav - Bakov nad Jizerou [kw•h/den]	1184,308
Celková očekávaná energetická náročnost vlaků nákladní dopavy Bakov nad Jizerou - Česká Lípa [kw•h/den]	3919,498
Celková očekávaná energetická náročnost vlaků nákladní dopavy Česká Lípa, hl.n. - Jablonné v Podještědí [kw•h/den]	1005,902
Celková očekávaná energetická náročnost vlaků nákladní dopavy Benešov nad Ploučnicí - Česká Lípa, hl.n. [kw•h/den]	0
Celková očekávaná energetická náročnost vlaků nákladní dopavy Děčín Východ - Benešov nad Ploučnicí [kw•h/den]	518,958

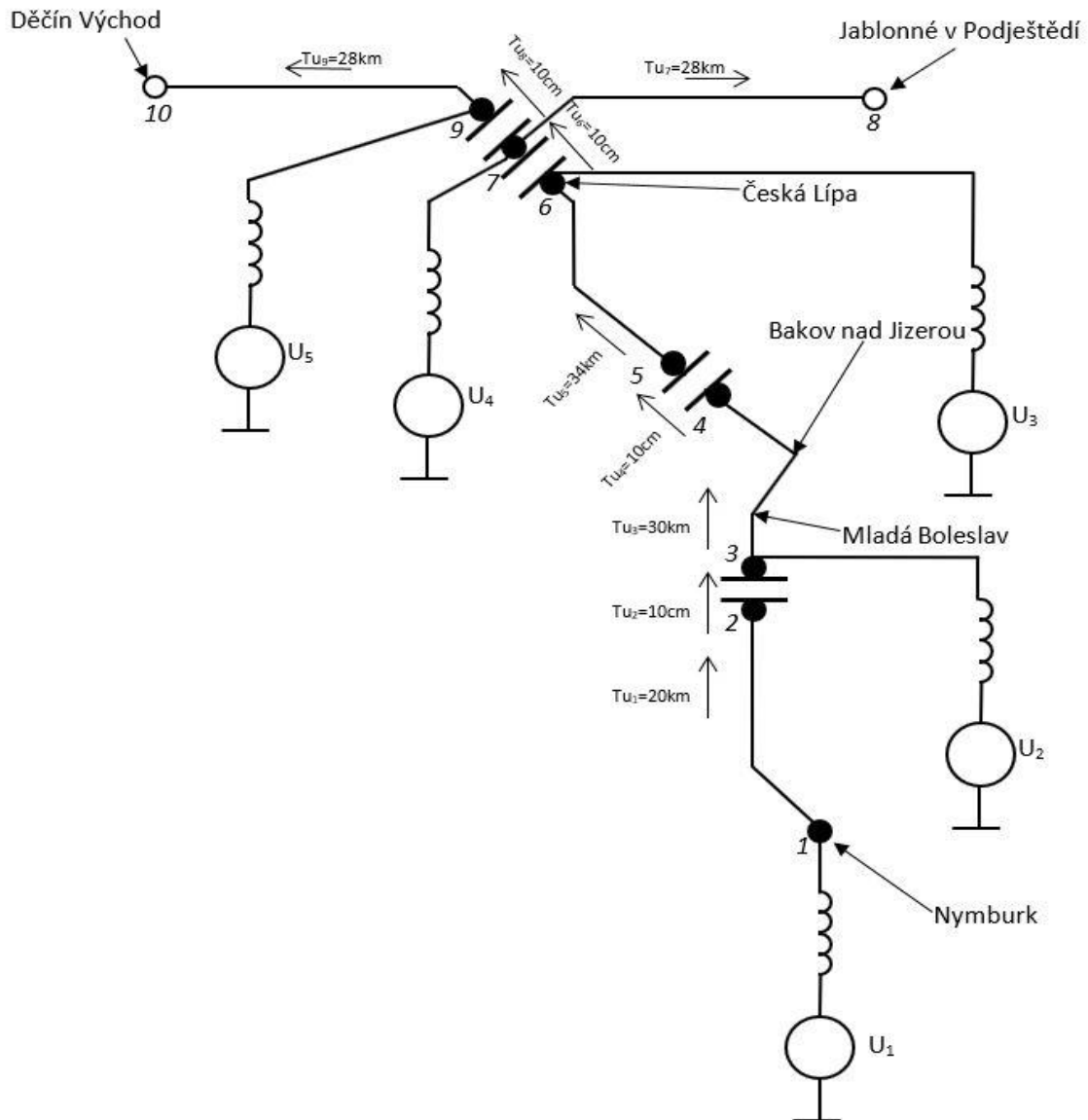
Tabulka 17 Přehledová tabulka předpokládaných energetických náročností vlaků nákladní dopavy [2]

Výkonová náročnost vlaků na trati mezi 15:00 a 17:00		
	střední hodnota	špičková hodnota
Celková výkonová náročnost vlaků osobní a nákladní dopavy Nymburk - Mladá Boleslav [Mw]	0,524162125	1,572486375
Celková výkonová náročnost vlaků osobní a nákladní dopavy Mladá Boleslav - Bakov nad Jizerou [Mw]	0,111557042	0,334671125
Celková výkonová náročnost vlaků osobní a nákladní dopavy Bakov nad Jizerou - Česká Lípa [Mw]	0,292273375	0,876820125
Celková výkonová náročnost vlaků osobní a nákladní dopavy Česká Lípa, hl.n. - Jablonné v Podještědí [Mw]	0,131163292	0,393489875
Celková výkonová náročnost vlaků osobní a nákladní dopavy Benešov nad Ploučnicí - Česká Lípa, hl.n. [Mw]	0,059313667	0,177941
Celková výkonová náročnost vlaků osobní a nákladní dopavy Děčín Východ - Benešov nad Ploučnicí [Mw]	0,067654917	0,20296475

Tabulka 18 Přehledová tabulka předpokládaných výkonových náročností vlaků na vybraných tratích mezi 15:00 a 17:00 [2]

## 2.5 Vytvoření schéma rozmístění napájecích stanic klasické koncepce

Na základě zjištěných hodnot minimální energetické a výkonové náročnosti tratí jsme připravili návrh rozmístění napájecích stanic, klasické koncepce. Při tomto návrhu jsme pracovali jen s omezenými informacemi o napěťové soustavě 110kV vedoucí podél vybraných tratí. Bylo třeba zjistit přesnější nároky na napájení tratí za pomoci výpočetního modelu na katedře **KEEZ**, který je vyvíjen pro simulaci zatížení napájecích stanic v definované lokalitě.



Obrázek 9 Schéma rozmístění napájecích stanic

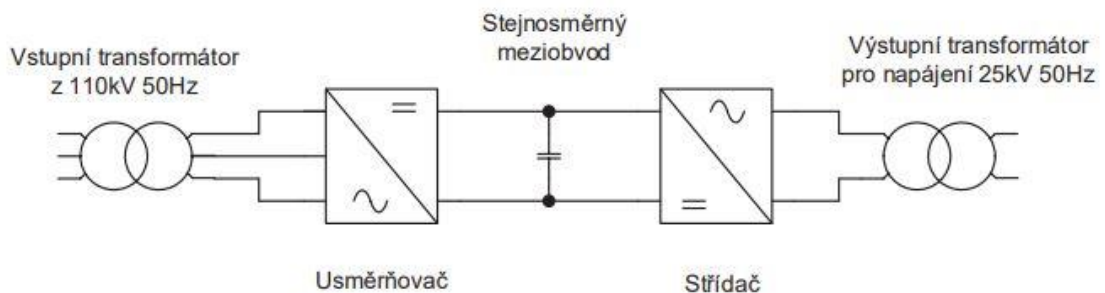
### 3. Porovnání systémů napájení tratí v oblasti severovýchodních Čech pro případy použití konvenčních napájecích stanic a měničových napájecích stanic v kombinaci s konvenčními

V této části si nejprve řekneme základní informace, které nám pomohou lépe porozumět problematice okolo měničových napájecích stanic. Dále si popíšeme základní parametry výpočetního modelu, který byl použit pro podrobnější analýzu. Na konec si v této části porovnáme výsledky provedené analýzy trati s použitím napájecích stanic klasické koncepce viz. **Obrázek 9** s výsledky analýzy kolegy Žižlavského v jeho diplomové práci **Analýza trakčních odběrů měničových napájecích stanic 25 kV 50 Hz**, který uvažoval pro budoucí elektrifikaci stejné tratě v oblasti severovýchodních Čech.

#### 3.1 Podrobnější charakteristika trakční soustavy 25 kV, 50 Hz AC s použitím měničových napájecích stanic

Z důvodů zvýšení efektivity při odběru elektrické energie z distribuční sítě se již jeví jako nedostačující použití jednoduchých transformátorových napájecích stanic. Proto je nutné použití modernějších technologií v podobě vysokonapěťových měničů, které nebylo možné v minulosti použít především z důvodu nedostatečných spínacích prvků. Ty nebylo možné nasadit při takto vysokém pracovním napětí. Dnes ovšem moderní měniče jsou schopny pracovat i na hladině VN a zajišťovat napájení i pro napěťovou soustavu 25 kV, 50 Hz. Mezi nejznámější dodavatele těchto prvků patří společnosti Hitachi ABB Power Grids a Siemens.

##### Schéma měničové stanice pro trakční soustavu 25 kV, 50 Hz AC



Obrázek 10 Blokové schéma měničové napájecí stanice [1]

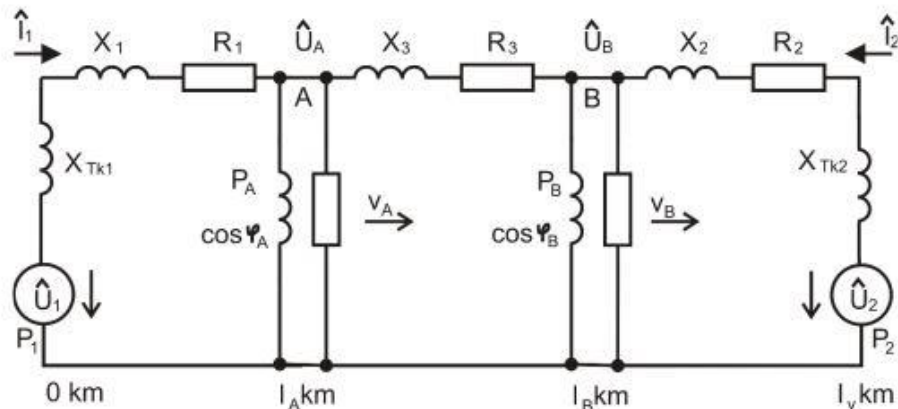
Při pohledu na blokové schéma viz. **Obrázek 10** je vidět složitější struktura měničové stanice, která sebou ovšem nese jisté výhody. Na vstupu ze 110 kV soustavy VVN je vidět „klasický“ třífázový transformátor, ke kterému jsou připojeny všechny tři fáze distribuční soustavy, a ne pouze dvě fáze, což znamená symetrické zatížení všech tří fází. Za trafem se nachází vysokonapěťový měnič, který má za úkol vytvořit říditelné jednofázové napětí. Skládá se z třífázového usměrňovače, stejnosměrného meziobvodu, jehož napětí je zhruba 10 až 15 kV a střídače. Za střídačem se nachází zvyšující transformátor, který napětí transformuje na požadovanou hodnotu v troleji.

Použití říditelného měniče nabízí potencionálně mnoho výhod. Ty pro nás nejdůležitější si vyjmenujeme níže v přehledu výhod a nevýhod této koncepce trakční napájecí soustavy.





Pro lepší představu je níže vloženo náhradní schéma dvou vlakových souprav mezi dvěma napájecími stanicemi na jednom traťovém úseku viz. **Obrázek 12**.



Obrázek 12 Náhradní schéma dvou vlaků v jednom úseku [1]

Výstupem z programu je excel soubor, jehož obsahem jsou časově závislé informace o:

- dodaných výkonech a energiích
- spotřebovaných výkonech a energiích
- celkové účinnosti přenosu a celkové ztráty
- výkonech, energiích a proudech napájecích stanic
- průběžích napětí traťových uzlů
- napětí vlaků na sběrači

Pro zpřesnění se opakují výpočty pro každou sekundu zadání vícekrát. Vzhledem k náročnosti, a především množství výpočtů při větším počtu vlaků a delších zkoumaných časových intervalech je reálný čas výpočtu poměrně dlouhý a orientačně předpokládá délku výpočtu i v řádech hodin při vytvořených dopravních scénářích. [1]

Při vyšším počtu napájecích stanic a traťových úseků lze očekávat délku výpočtu i v jednotkách dnů, proto je vhodné opravdu si před zadáním parametru trati řádně rozmyslet rozmístění napájecích stanic a případných neutrálních polí (pro případ klasické koncepce).

#### Vstup do modelu (vstupní data programu)

Na začátku musíme zadat vstupní data, která nám stanoví strukturu tratě, rozmístění napájecích stanic a neutrálních polí viz. **Tabulka 19**.

Traťový úsek č.	Uzel poč. č.	Uzel kon. č.	Délka (km)	Poměr. impedance (Ohm/km)
1	1	2	20	0.26+j*0.55
2	2	3	0.0001	10000000
3	3	4	30	0.26+j*0.55
4	4	5	0.0001	10000000
5	5	6	34	0.26+j*0.55
6	6	7	0.0001	10000000
7	7	8	28	0.26+j*0.55
8	7	9	0.0001	10000000
9	9	10	28	0.26+j*0.55

Tabulka 19 Zadání struktury trati

V tabulce **19** specifikován každý úsek trati. Úsek začíná a končí v uzlech, které jsou taktéž konkrétně označeny. Díky tomu je možné docílit přesného zadání i u složitějších napájecích struktur a rozsáhlejších tratí. Zadaný případ struktury v tabulce popisuje reálnou oblast, která je graficky vykreslena dle mapky na obrázku **6**. Zvýrazněný uzel je místo, kde se nachází napájecí stanice nebo konec traťového úseku opatřený neutrálním polem V tabulce je dále uvedena délka každého úseku trati a předpokládaná impedance vedení na základě vlastností trolejového vedení.

Dále je třeba znát předpokládané výkonové dimenzování stanic a jejich typ (měničová nebo konvenční) viz **Tabulka 20**.

Napájecí stanice	Uzel č.	Reaktance NS (Ohm)	Napětí NS (V)	Mezní výkon NS (MW)	Reg. NS
1	1	7.5	27000	20	1
2	3	7.5	27000	20	1
3	6	7.5	27000	20	1
4	7	7.5	27000	20	1
5	9	7.5	27000	20	1

Tabulka 20 Definování napájecích stanic

**Tabulka 20** nám popisuje rozmístění napájecích stanic a jejich typ. V případě, že je stanice uvnitř úseku, je nutné toto vzít v potaz už při zadávání traťové struktury a v místě napájecí stanice vytvořit uzel. Všechny stanice mají své číslo, umístění, mezní výkon a napětí. Dále je zde parametr pro reaktanci, díky němuž můžeme rozlišit, zda se jedná o měničovou napájecí stanici nebo stanici konvenční koncepce (v tabulce **20** jsou pouze stanice konvenční koncepce). Reaktance napájecích stanic jsou v tomto případě v podstatě reaktancemi transformátorů nakrátko

V poslední části zadání se zadávají konkrétní vlaky pohybující se po vymezené oblasti trati.

Trasa po trati	Poč. km	Konc. km
3	18.99	0
1	20	0

Tabulka 21 Trasa vlaku 13 v čase 7:00 až 9:00

Každý jeden vlak pak musí mít zadaný pohyb po trati. Vždy se vyplní daný úsek plus startovní a koncová poloha vlaku v daném úseku. Pokud se budeme bavit o vlaku jezdícím v daném úseku tam a zpět je potřeba za definovat řádky pro zpáteční cestu. Pro jízdu vlaku z Bakova nad Jizerou do Nymburka bude zadávací tabulka vypadat následovně. Příklad je uveden v tabulce **21**, kde je místo Poč. km 19 uveden Poč. km 18,9, což je pro program přijatelné a simulaci provede.

Důležité informace o aktuálním pohybu vlaku v každé jedné sekundě jsou pak uvedena do tří sloupců. Bavíme se tu o aktuální rychlosti vlaku, příkonu vozidla a účinníku, se kterým vozidlo odebírá elektrickou energii viz. **Tabulka 22**.

vlak1 v(km/h)	vlak1 P(kW)	vlak1 cosfi
0	0.1	0.99

Tabulka 22 Sloupce pro zadání aktuálních dat vlaku

Pro zadání všech těchto dat byl zvolen tabulkový procesor excel. Excel byl zvolen primárně z důvodu jednoduchého propojení s modelem, který byl naprogramován v MATLABu.

### Výstup z modelu (výstup dat z programu)

Model po ukončení výpočtu vygeneruje ve svém adresáři excel soubor formátu .xlsx, ve kterém jsou organizována vypočtená data.

Pro názornost přikládám níže tabulku 22, která slouží jako příklad vybraných sloupců s výsledky dané simulace.

Čas [s]	Čas [min]	P NS 1 [kW]	E NS 1 [kWh]	Proud NS 1 [A]	C.TU vlaku 6	km vlaku 6 [km]	Dráha vlaku 6 [km]	Napětí vlaku 6 [kV]
60	1	0.56622	0.00944	0.03054	4	17.99	0	27.0017
120	2	0.56622	0.01887	0.03054	4	17.99	0	27.0017
180	3	0.58406	0.02861	0.03114	4	17.6295	0.36047	26.8626
240	4	0.60418	0.03868	0.0318	4	16.4649	1.52505	26.7222
300	5	143.968	2.43814	5.38474	4	15.3003	2.68972	26.9674
360	6	297.586	7.3979	11.2414	4	14.1327	3.85726	27.1954
420	7	194.147	10.6337	7.26137	4	14.0348	3.95524	26.9642
480	8	3084.6	62.0437	115.687	4	13.5806	4.40944	26.9639
540	9	2035.94	95.9761	76.5332	4	12.4702	5.51978	27.0421
600	10	590.361	105.815	22.0929	4	12.4051	5.58492	26.9953

Tabulka 23 Příklad vybraných sloupců výsledkové tabulky [1]

### 3.3 Porovnání výsledků analýzy modelů systémů napájení tratí v oblasti severovýchodních Čech pro případy použití konvenčních napájecích stanic a měničových napájecích stanic

Pro srovnání návrhu systému napájecích stanic klasické koncepce s návrhem koncepce, která zahrnuje využití měničových napájecích stanic bylo třeba do této práce zahrnout návrh a výsledky kolegy Bc. Petra Žižlavského, který ve své diplomové práci s názvem **Analýza trakčních odběrů měničových napájecích stanic 25 kV 50 Hz** vytvořil návrh na stejném principu s tím rozdílem, že v jeho práci bylo uvažováno souvislé napájení všech traťových úseků a kombinace napájecí stanice klasické koncepce s napájecí stanicí využívající k napájení statického měniče. V mém návrhu dle klasické koncepce jsou uvažovány izolované jednostranně napájené úseky s neutrálními poli.

Z důvodu co nejlepšího srovnání obou návrhů byly z výše zmiňované práce převzaty dopravní scénáře, které už samy osobě vznikly s cílem co nejpřesněji napodobit reálné zatížení tratí (vycházejí ze současných grafikonů). Struktura zadávacího formuláře stanovila fakt, že každý vlak je třeba definovat zvlášť, a proto bylo nutné vytvořit kompletní jízdní řád. Tento jízdní řád obsahuje dva dopravní scénáře pro časové intervaly ráno od 7 hodin do 9 hodin a odpoledne od 15 hodin do 17 hodin. Oba scénáře zahrnovaly jak vlaky osobní dopravy, tak vlaky nákladní dopravy a jsou tak v souladu s očekávaným navýšením zátěže z hlediska osobní i nákladní dopravy.

Pro aspoň částečné přiblížení obsáhlosti obou scénářů bude v této části níže uvedeno množství vlaků, jejich typ a odhadovaná hmotnost.

Ranní scénář obsahuje 7 rychlíků a 12 vlaků osobních tedy, dohromady 19 vlaků osobní dopravy. Všechny vlaky osobní dopravy mají fyzické parametry dvou vozového RegioPanteru. Toto vozidlo je moderní elektrická jednotka, která má již dnes velké zastoupení na našich tratích a jeho nasazení nebo obdobných jednotek lze v případě elektrizace tratí očekávat. Uvažovaná hmotnost těchto osobních vlaků tvořených jedním dvouvozovým Regiopanterem je 120 tun. V případě rychlíků uvažujeme o dvou spřažených Regiopanterech o celkové hmotnosti 240 tun.

Dále se v raním scénáři počítá s 11 vlaky nákladní dopravy. U čtyřech těchto vlaků je předpokládaná hmotnost 500 tun, dvou vlaků 1000 tun a u pěti vlaků se očekává hmotnost dosahující 1500 tun.

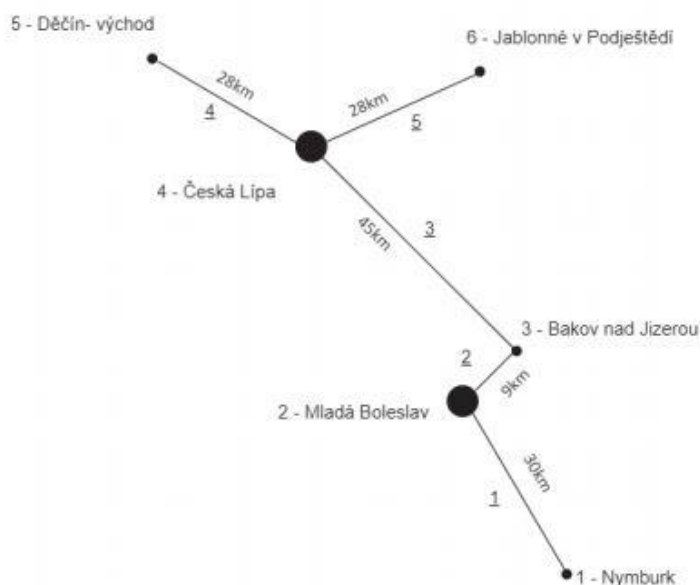
Odpolední scénář obsahuje 8 rychlíků, 2 spěšné vlaky a 15 vlaků osobních, tedy dohromady 25 vlaků osobní dopravy. Všechny vlaky osobní dopravy mají stejně jako v ranním scénáři fyzické parametry dvou vozového RegioPanteru. Tedy jejich uvažovaná hmotnost je 120 tun v případě spěšných vlaků a vlaků osobních. U rychlíků uvažujeme stejně jako v raním scénáři dva spřažené Regiopantery o celkové hmotnosti 240 tun.

Dále se v odpolední scénáři počítá s 12 vlaky nákladními dopravy. U pěti těchto vlaků je předpokládaná hmotnost 500 tun, jednoho vlaku 1000 tun a u šesti vlaků se očekává hmotnost dosahující 1500 tun.

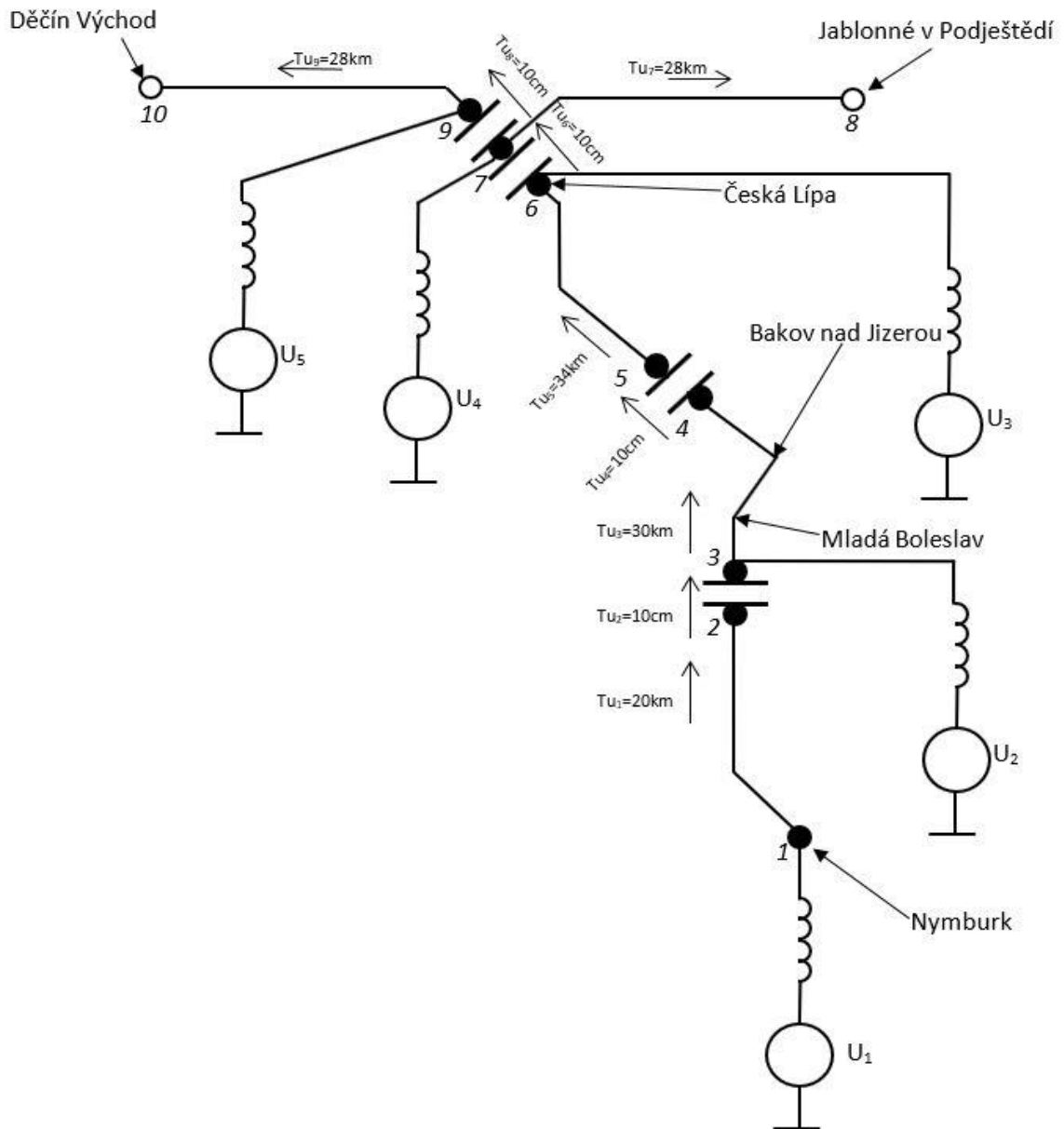
Toto je samozřejmě jenom velmi hrubé nastínění, a tak jsou do příloh zařezané v elektronické podobě oba zadávací formuláře, výsledkové tabulky a jízdní řád vytvořený kolegou Žižlavským.

Před samotným porovnáním výsledků jsou níže vložena k porovnání schémata návrhu rozmístění napájecích stanic dle obou koncepcí.

### Porovnání schémat rozmístění napájecích stanic dle obou koncepcí



Obrázek 13 Schéma rozmístění napájecích stanic při spojitém napájení (koncepte s využitím měničové napájecí stanice) [1]

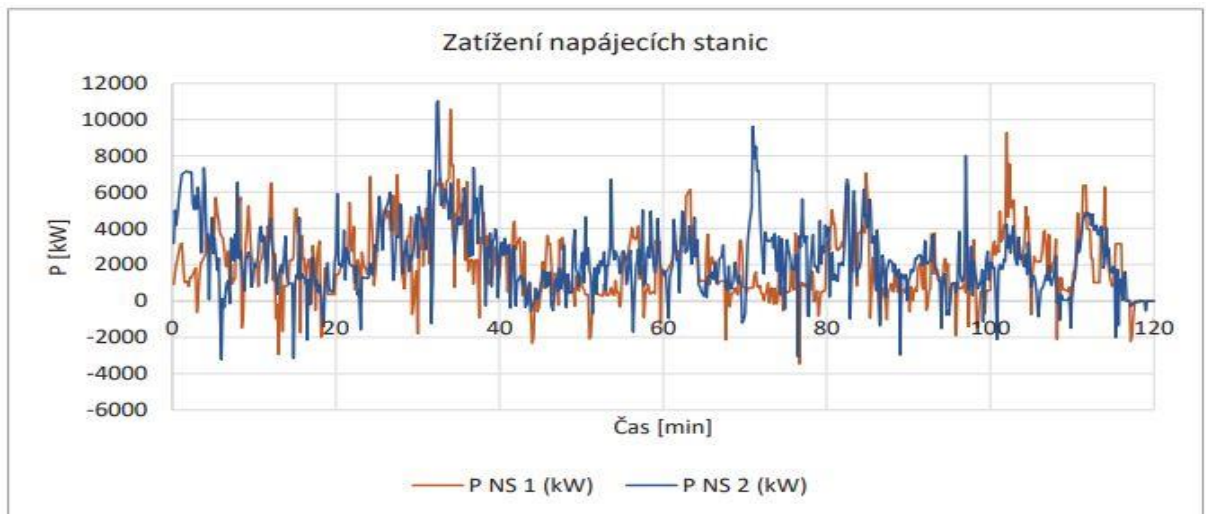


Obrázek 14 Schéma rozmístění napájecích stanic při nespojitém napájení (klasická koncepce)

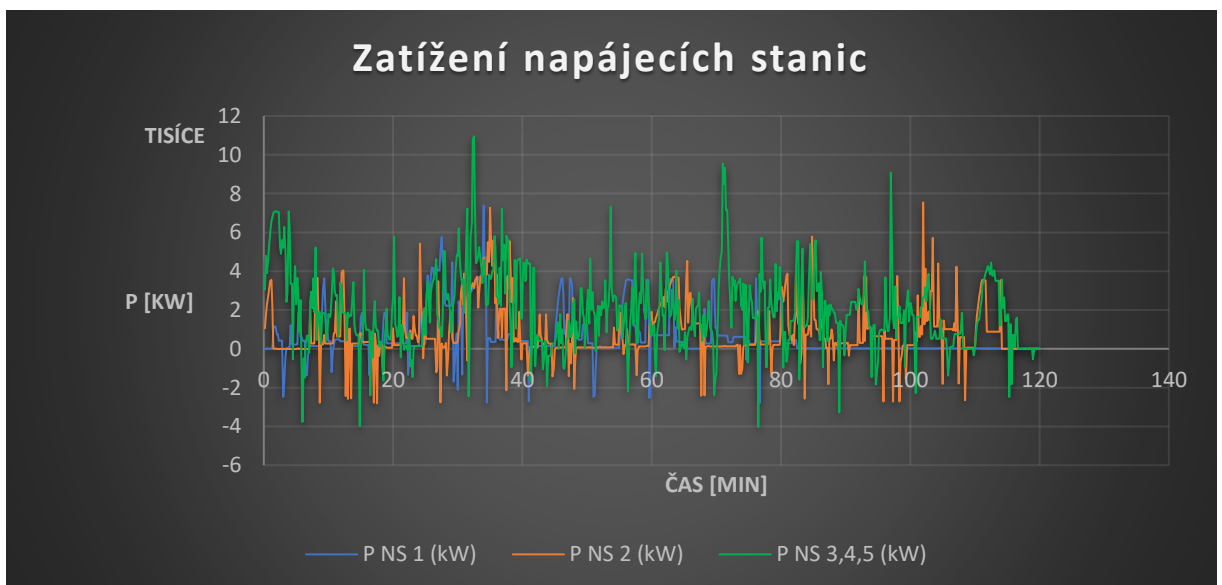
V kolegově návrhu byla uvažována napájecí stanice klasické koncepce v Mladé Boleslavi a měničová napájecí stanice v České Lípě viz. **Obrázek 13**. Jedním z hlavních rozdílů je skutečnost, že kolega neuvažoval napájecí stanici v městě Nymburk, která je zde ale velmi praktická z důvodu polohy rozvodny energetické infrastruktury, jež se nachází poblíž železniční trati. Dále je zde výrazný rozdíl v tom, že v konceptu dle kolegova návrhu je možné spojitě napájení tratí vzhledem k vlastnostem měničové napájecí stanice, což bohužel není v návrhu dle klasické koncepce možné. Případné propojení sousedních traťových úseků by vedlo v případě klasické koncepce k okamžitému vzniku vyrovnávacích proudů, což je pro nás nepřijatelné.

Z výše zmíněných důvodů bylo nutno v návrhu klasické koncepce rozdělit trať na více menších traťových úseků, než v případě kolegova návrhu a celou napájecí stanici Česká Lípa pojmout jako tři napěťové zdroje, jejichž výkony budeme muset pro správnou interpretaci počítat. Tuto situaci si lze prohlédnout na obrázku 14.

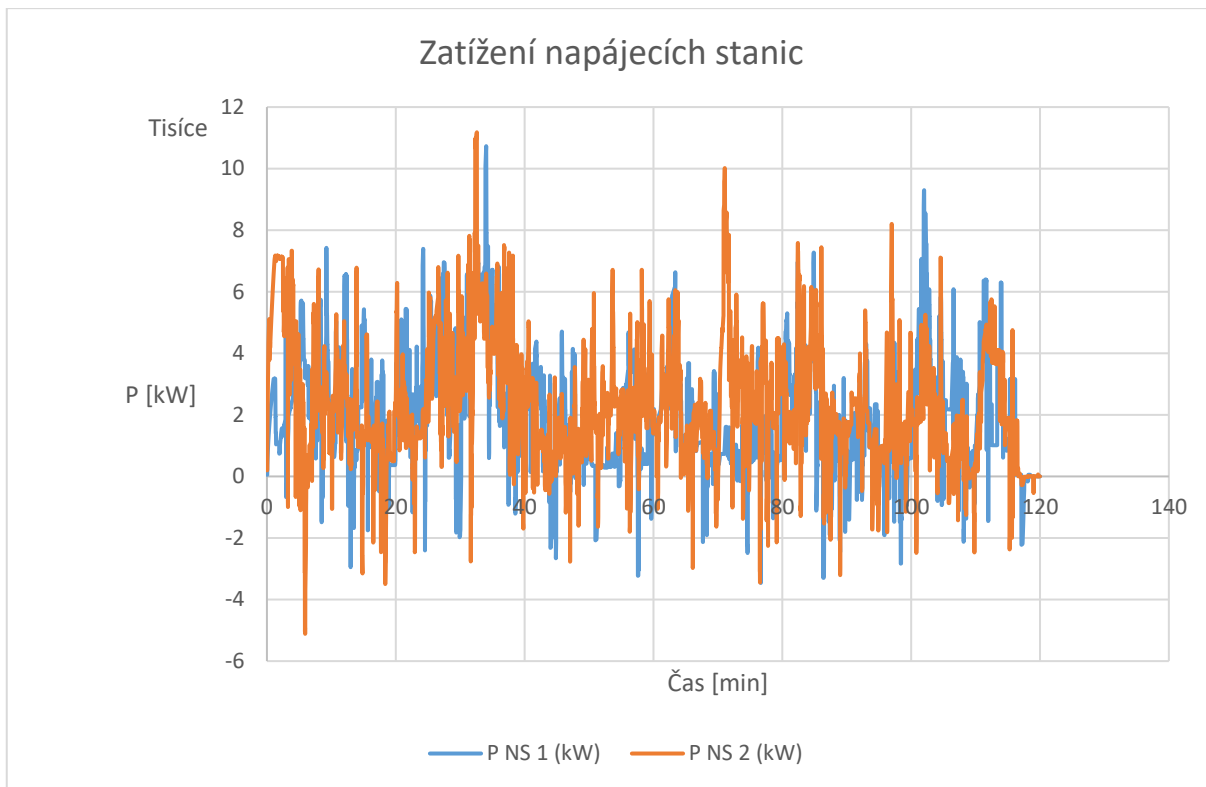
## Porovnání výsledků z ranních scénářů



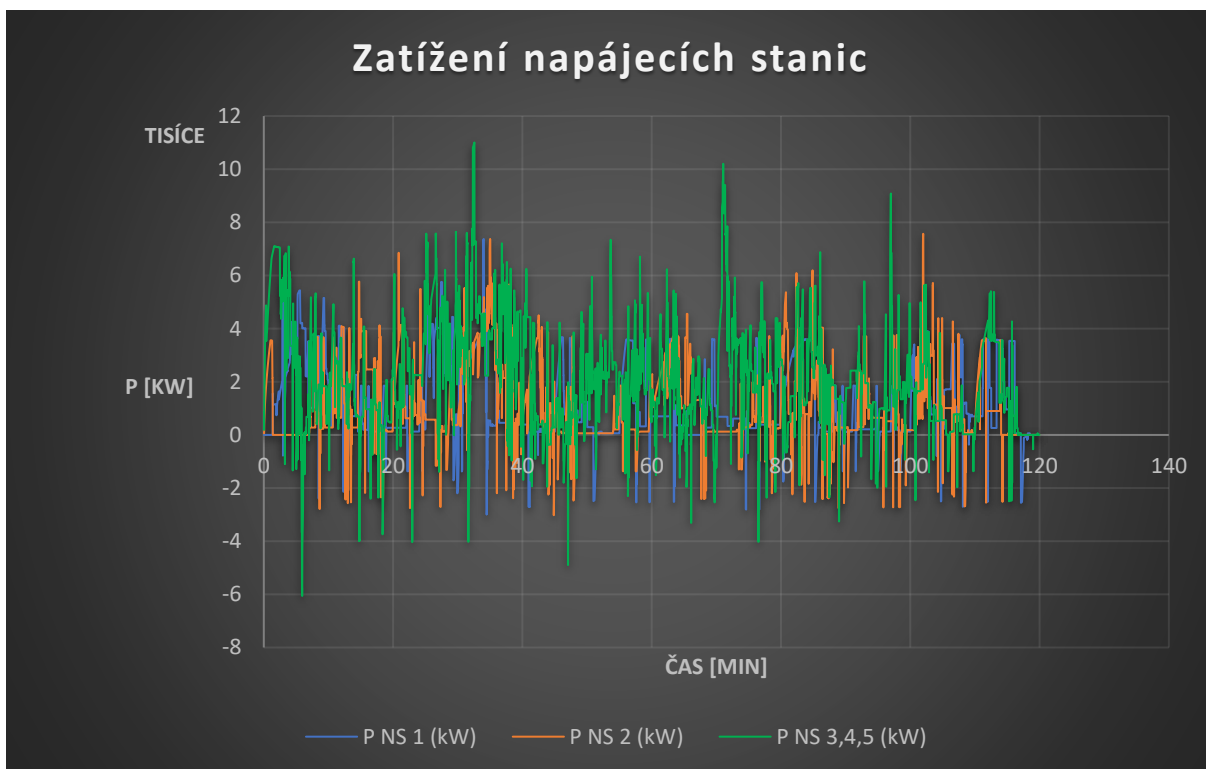
Obrázek 15 Zatížení napájecích stanic v raním scénáři při  $T=10s$  (koncepte s využitím měničové napájecí stanice) [1]



Obrázek 16 Zatížení napájecích stanic v raním scénáři při  $T=10s$  (klasická koncepce)



Obrázek 17 Zatížení napájecích stanic v raním scénáři při  $T=1s$  (koncepte s využitím měničové napájecí stanice)



Obrázek 18 Zatížení napájecích stanic v raním scénáři při  $T=1s$  (klasická koncepce)

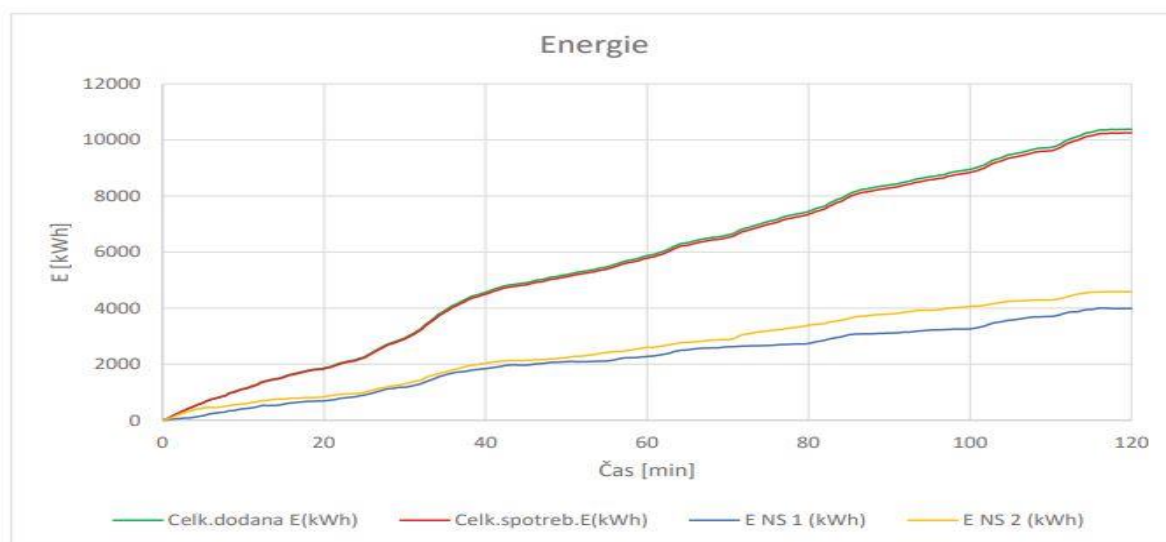
Při pohledu na obrázky 15, 16, 17 a 18 lze konstatovat, že zatížení napájecích stanic v průběhu modelu značně kolísá a nachází se zde mnoho výkonových špiček, které dosahují různé velikosti. Při porovnání grafů na obrázcích 17 a 18 si můžeme povšimnout, jak přidáním napájecí stanice klasické koncepce v Nymburce došlo k omezení absolutní hodnoty špičkových výkonů napájecí stanice u Mladé

Boleslavi. Pokud se podíváme blíže na napájecí stanice v České Lípě, tam se situace na první pohled příliš nezměnila. Výkonové špičky jsou ve stejných místech a mají i takřka stejnou velikost. Dále je zde níže pro srovnání uvedena tabulka vypovídající o rozdílu maximálních hodnot zatížení napájecí stanice v České Lípě, jenž se v obou návrzích liší. V prvním sloupečku je výsledek z návrhu klasické koncepce a ve druhém sloupečku je výsledek z návrhu uvažujícím měničovou napájecí stanici.

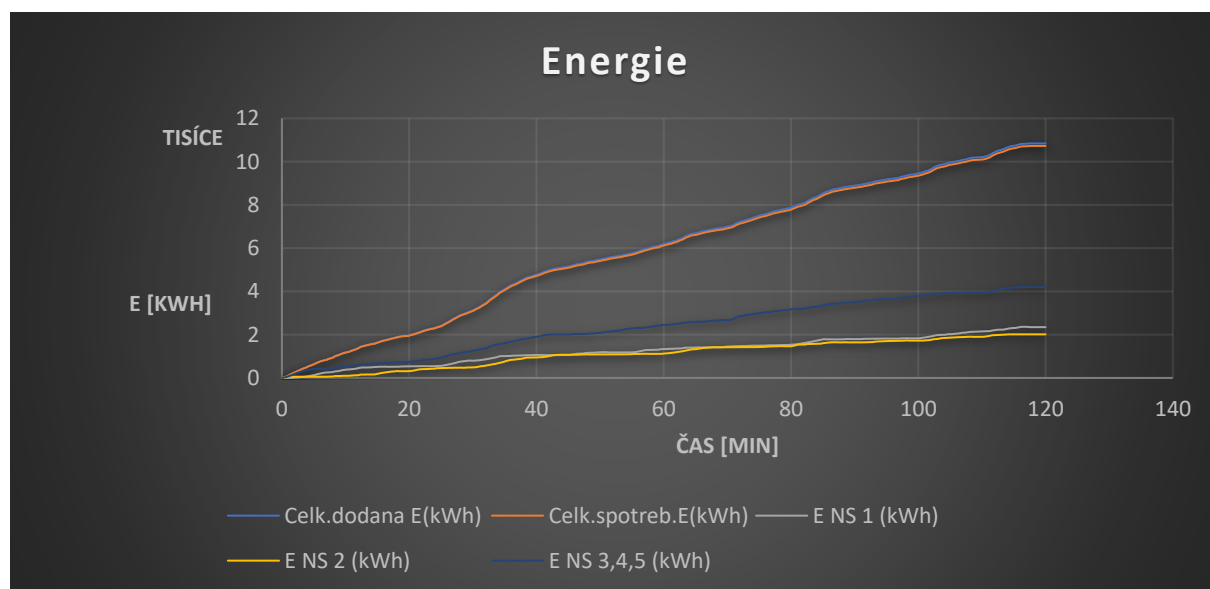
Tabulka znázorňující rozdíl maximálního zatížení napájecí stanice v České Lípě			
Klasická koncepce	Návrh s měničovou napájecí stanicí		
P NS 3,4,5 [kW]	P NS 2 [kW]	Rozdíl [kW]	Rozdíl [%]
11007,1098	11181,405	-174,295	1,583

Tabulka 24 Tabulka porovnávající maximální hodnoty zatížení napájecích stanic v České Lípě v ranním scénáři

Obecně je ovšem třeba konstatovat, že průběh zatížení je velmi proměnlivý v kontextu s tím, jak se každým okamžikem mění spotřeba vlaků.



Obrázek 19 Spotřeba energií v ranním scénáři (koncepte s využitím měničové napájecí stanice) [1]



Obrázek 20 Spotřeba energií v ranním scénáři (klasická koncepce)



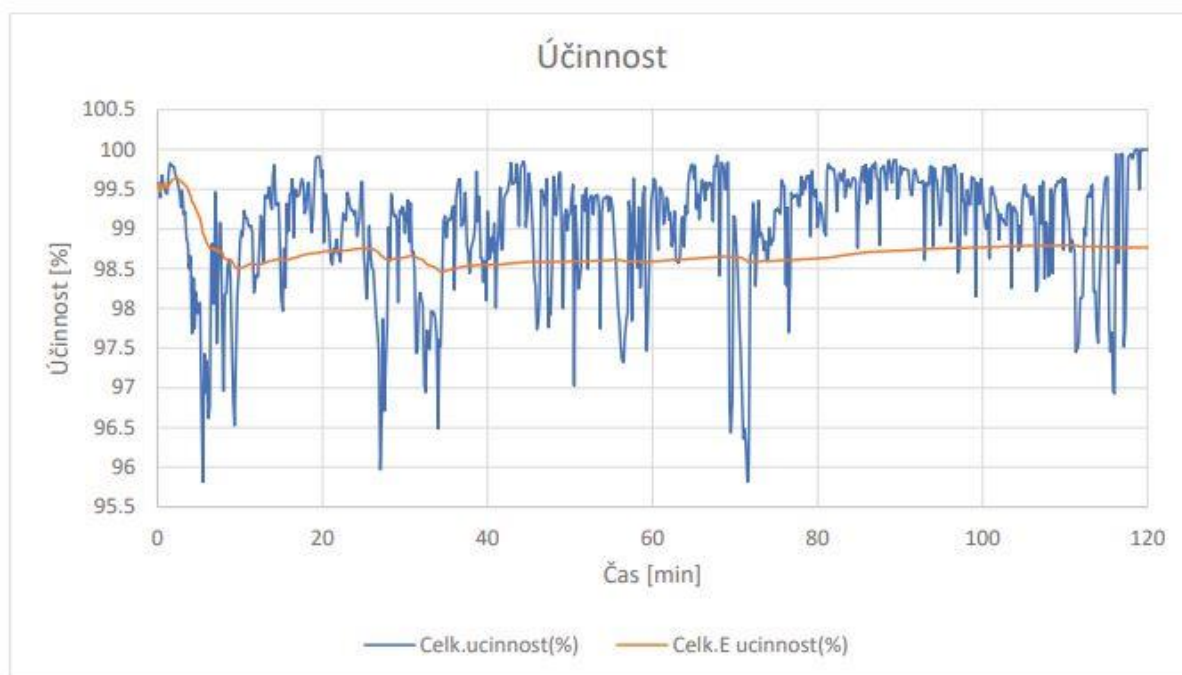
Při pohledu na výsledky analýz nás nejvíce zajímá celková dodaná energie **E**, která nám řekne, jestli zařazení měničové napájecí stanice přinese nějakou úsporu energie oproti klasické koncepci. Už při prvním pohledu na obrázky **19** a **20**, kde jsou z hodnot vykreslené grafy je nám jasné, že zde k nějaké úspoře energie dojde.

Pro bližší určení k jak velké úspoře energie dojde, jsme vyjmuli z analýz dvě poslední nejvyšší hodnoty a porovnali je v tabulce **25**. V prvním sloupečku je výsledek z návrhu klasické koncepce a ve druhém sloupečku je výsledek z návrhu uvažujícím měničovou napájecí stanici.

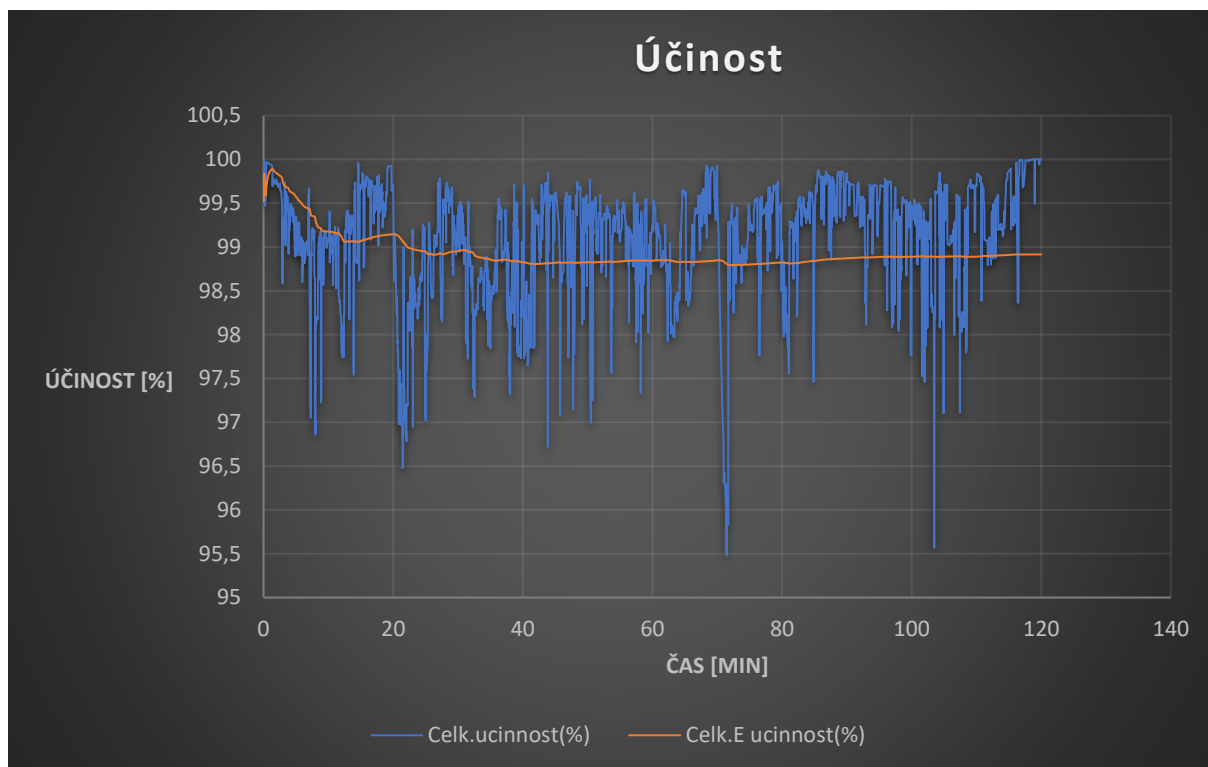
Tabulka znázorňující rozdíl v celkové dodané energii			
Klasická koncepce	Návrh s měničovou napájecí stanicí		
Celk.dodana E [kWh]	Celk.dodana E [kWh]	Rozdíl [kWh]	Rozdíl [%]
10843,145	10381,040	462,105	4,262

Tabulka 25 Tabulka porovnávající celkové dodané energie v obou analýzách v ranním scénáři

Po přezkoumání hodnot dojdeme k závěru, že zařazení měničové napájecí stanice přinese minimálně 4% úsporu energie cca 462 kW•h. Dalším důležitým faktem je skutečnost, že tuto úsporu přinese měničová napájecí stanice i přes předpokládané optimálnější rozmístění napájecích stanic v návrhu klasické koncepce, kdy je uvažována napájecí stanice v Nymburce.



Obrázek 21 Graf průběhu účinnosti v ranním scénáři (koncepte s využitím měničové napájecí stanice) [1]



Obrázek 22 Graf průběhu účinností v ranním scénáři (klasická koncepce) [1]

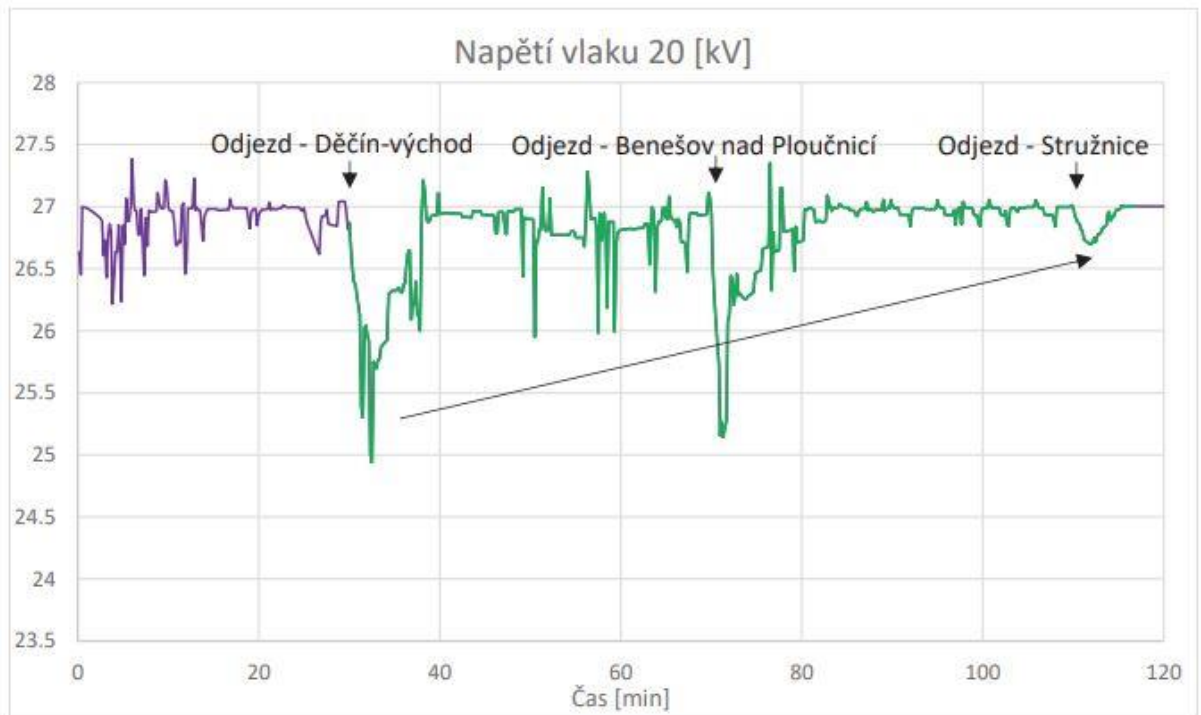
Grafy na obrázcích **21** a **22** nám znázorňují účinnost napájení. Modrá křivka vypočtena z výkonů nám znázorňuje momentální účinnost v daném okamžiku, která velmi často kolísá. V pár případech dokonce klesne až pod 96%. Druhá křivka vypočtena z energií nám znázorňuje celkovou účinnost do daného okamžiku zde poněkud na první pohled překvapivě se nám ukázalo, že celková účinnost je lepší v případě klasické koncepce, jak dokládají i hodnoty v tabulce **26** níže, kde v prvním sloupečku je hodnota návrhu klasické koncepce a ve druhém je výsledek z návrhu uvažující měničovou napájecí stanicí. Tato lepší účinnost je zcela jistě zapříčiněna vhodnějším návrhem rozmístění napájecích stanic v případě klasické koncepce, kde je uvažována navíc napájecí stanice v Nymburce. Napájecí stanice v Nymburce nám díky kratší vzdálenosti efektivněji napájí traťový úsek č.1 znázorněný na obrázku **14** a pomáhá k efektivnějšímu přenosu rekuperované energie. V prvním sloupečku je výsledek z návrhu klasické koncepce a ve druhém sloupečku je výsledek z návrhu uvažujícím měničovou napájecí stanicí.

Tabulka znázorňující rozdíl celkové E účinnosti		
Klasická koncepce	Návrh s měničovou napájecí stanicí	
Celk.E účinnost [%]	Celk.E účinnost [%]	Rozdíl [%]
98,916	98,773	0,143

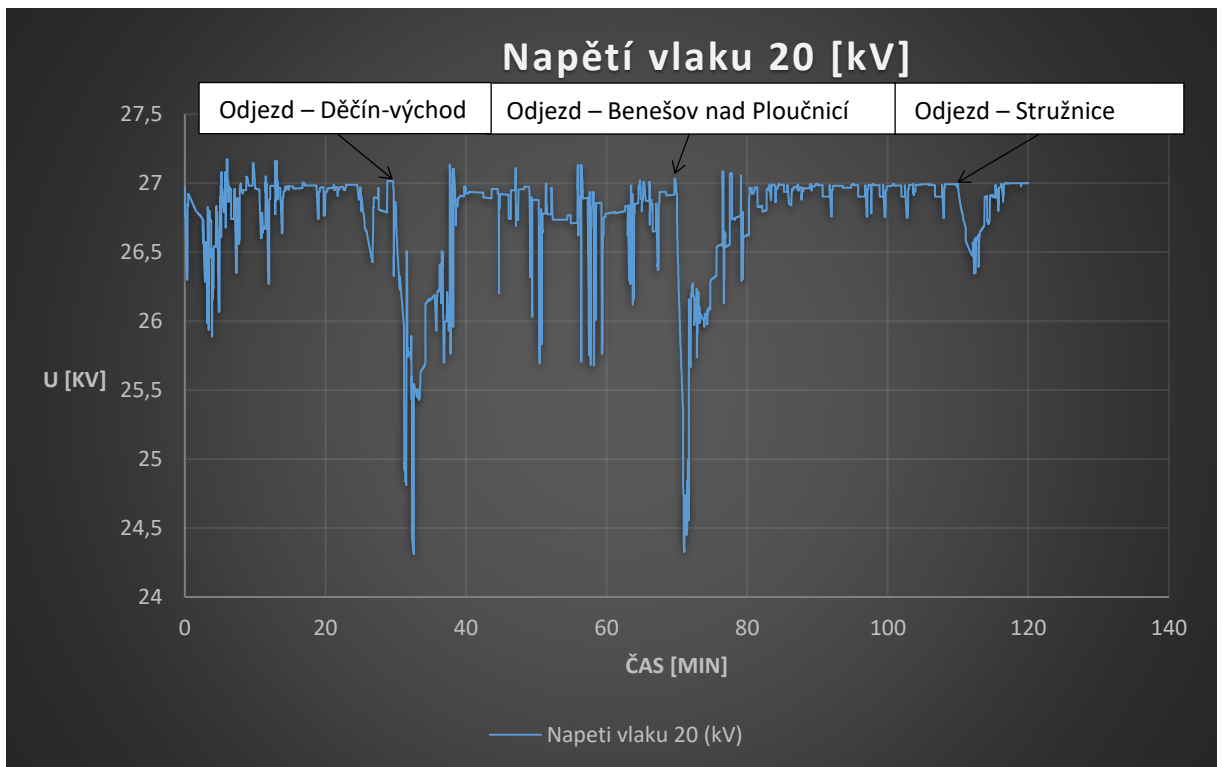
Tabulka 26 Tabulka znázorňující rozdíl celkové E účinnosti v ranním scénáři

Pro úplnost si porovnáme i další grafy sdělující nám napětí na sběračích vybraných vlaků během jízdy v raním modelu. Nejvíce nás v tomto případě bude zajímat, jak se projeví na napětí na sběračích skutečnost, že v České Lípě není jako v případě kolegova návrhu uvažována měničová napájecí stanice, ale stanice klasické koncepce. Dále nás bude zajímat, jak moc pozitivně se projeví umístění klasické napájecí stanice v Nymburce oproti návrhu, kde uvažována nebyla a nejvíce zatížený úsek z Nymburka do Mladé Boleslavi byl napájen jednostranně z Mladé Boleslavi.

Pro ověření, jak velký vliv má měničová napájecí stanice na tvrdost napětí použijeme analýzu cesty vlaku 20, který jede z Děčína do České Lípy.



Obrázek 23 Průběh napětí na sběrači vlaku 20 v ranním scénáři (koncepte s využitím měničové napájecí stanice) [1]



Obrázek 24 Průběh napětí na sběrači vlaku 20 v ranním scénáři (klasická koncepce)

Při pohledu na obrázky 23 a 24 je na první pohled vidět, jak velký vliv má měničová napájecí stanice na tvrdost napětí na sběrači vlaku 20, kde vidíme zachování míst největších napěťových poklesů v daných časech, ale v případě koncepce s použitím, kde je použita měničová napájecí stanice jsou poklesy podstatně menší.

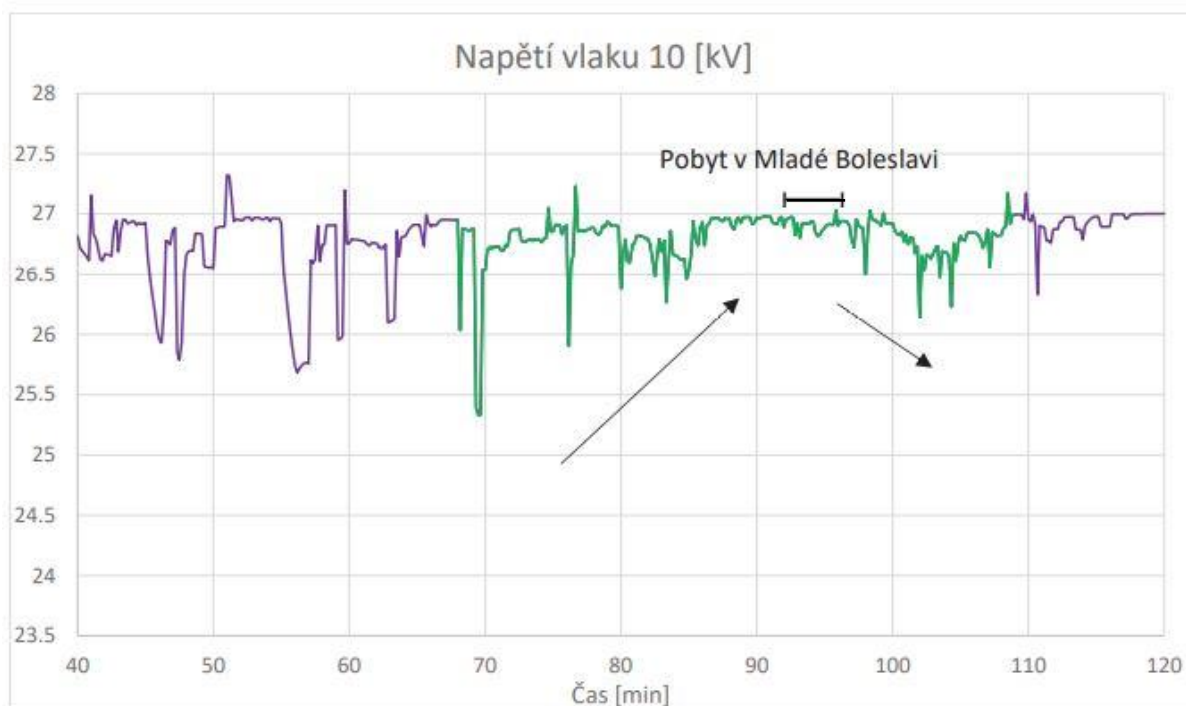
**Tabulka 27** dokládá přesněji pro porovnání poklesy napětí na sběrači vlaku 20 pro obě koncepce. V prvním sloupečku je minimální vypočtené napětí za použití klasické koncepce a ve druhém je minimální napětí vypočtené při použití měničové napájecí stanice.

Tabulka znázorňující rozdíl poklesu napětí na sběrači vlaku 20			
Klasická koncepce	Návrh s měničovou napájecí stanicí		
Napětí vlaku 20 [kV]	Napětí vlaku 20 [kV]	Rozdíl [kV]	Rozdíl [%]
24,312	24,916	-0,603	2,482

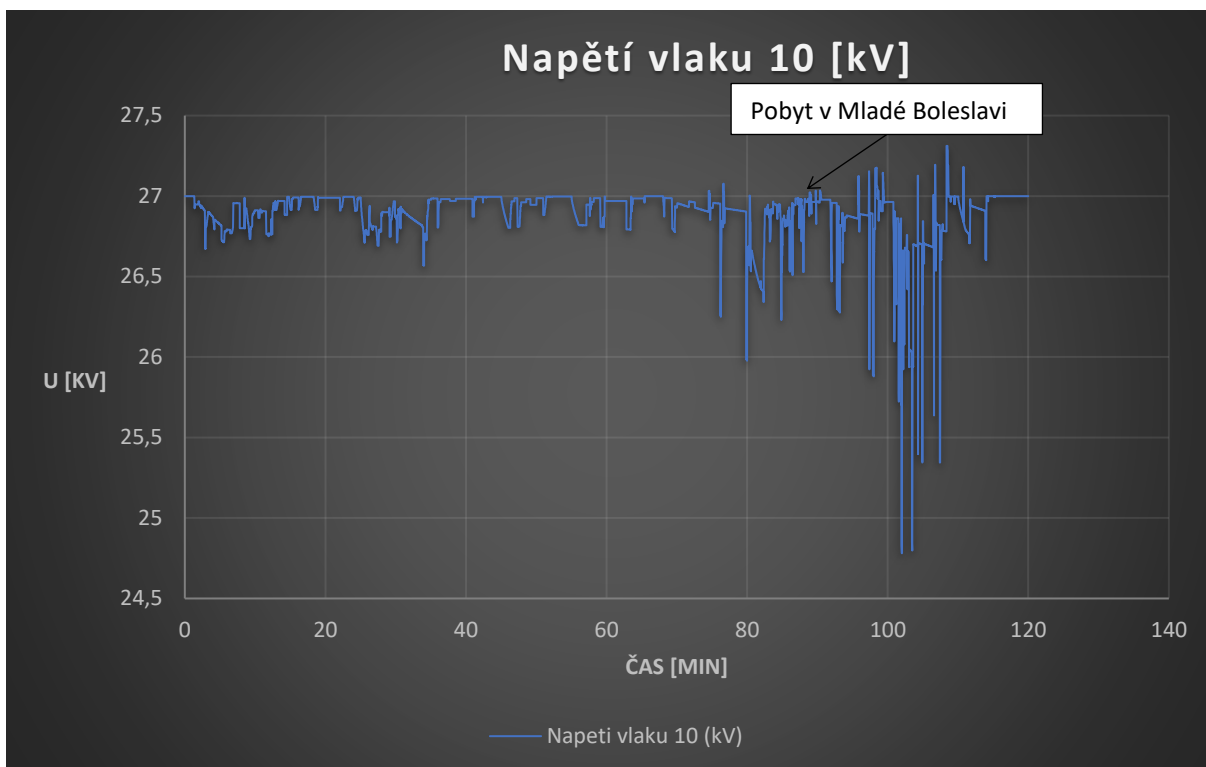
Tabulka 27 Tabulka znázorňující rozdíl poklesu napětí na sběrači vlaku 20 pro ranní scénář

Z průběhu grafů na obrázcích 23, 24 a tabulky 27 je patrné, že rozdíl v tvrdosti napětí při použití měničové napájecí stanice je poměrně značný a může činit rozdíl i cca 600 V.

Další pro nás zajímavý vlak je vlak číslo 10, který jede z Nymburka do Bělé pod Bezdězem (v úseku Nymburk – Mladá Boleslav). U vlaku číslo 10 lze očekávat velké rozdíly v napětí poblíž Nymburka, kdy rozdíl v délce trakčního vedení mezi napájecí stanicí a vlakem bude značný.



Obrázek 25 Průběh napětí na sběrači vlaku 10 v ranní scénáři (koncepce s využitím měničové napájecí stanice) [1]



Obrázek 26 Průběh napětí na sběrači vlaku 10 v ranním scénáři (klasická koncepce)

Při pohledu na obrázky 25 a 26 je na první pohled vidět, jak velký vliv má umístění napájecí stanice v Nymburce na tvrdost napětí na sběrači vlaku 10, kde vidíme v úseku poblíž Nymburka až do Mladé Boleslavi jen velmi malý pokles napětí, které až na jeden úsek neklesá pod 26 kV viz. **Obrázek 26**. V případě, kdy není tato napájecí stanice uvažována, klesá napětí pod 26 kV podstatně častěji.

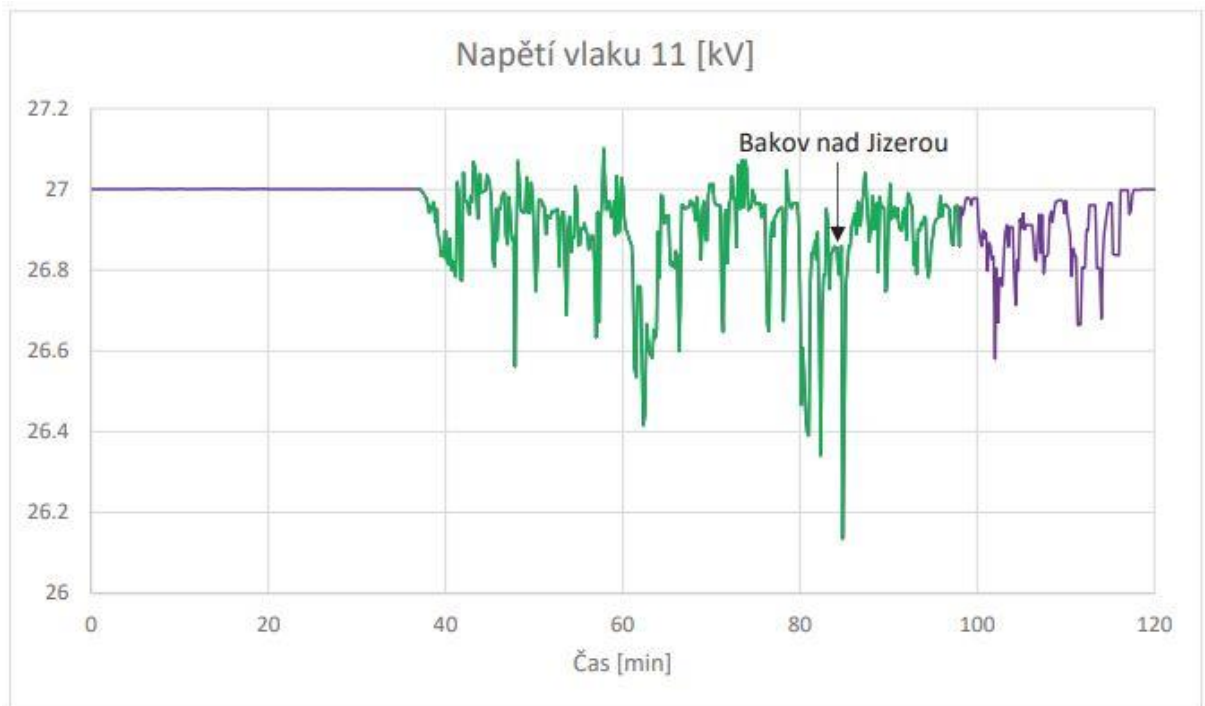
Za povšimnutí stojí poklesy napětí na obrázku 26 mezi 100 a 120 minutou, kde napětí klesá až pod 25 kV. To je dáno dvěma důvody. Prvním důvodem je nepřispívání napájecí stanicí v České Lípě. Druhým důvodem je skutečnost, že napájecí stanice není v tomto případě umístěna přímo v Mladé Boleslavi, ale několik kilometrů od Mladé Boleslavi poblíž Dobrovic.

Vše doplňuje **Tabulka 28**, kterou je potřeba chápat v kontextu výše zmíněného. V prvním sloupečku je minimální vypočtené napětí za použití klasické koncepce a ve druhém je minimální napětí vypočtené při použití měničové napájecí stanice.

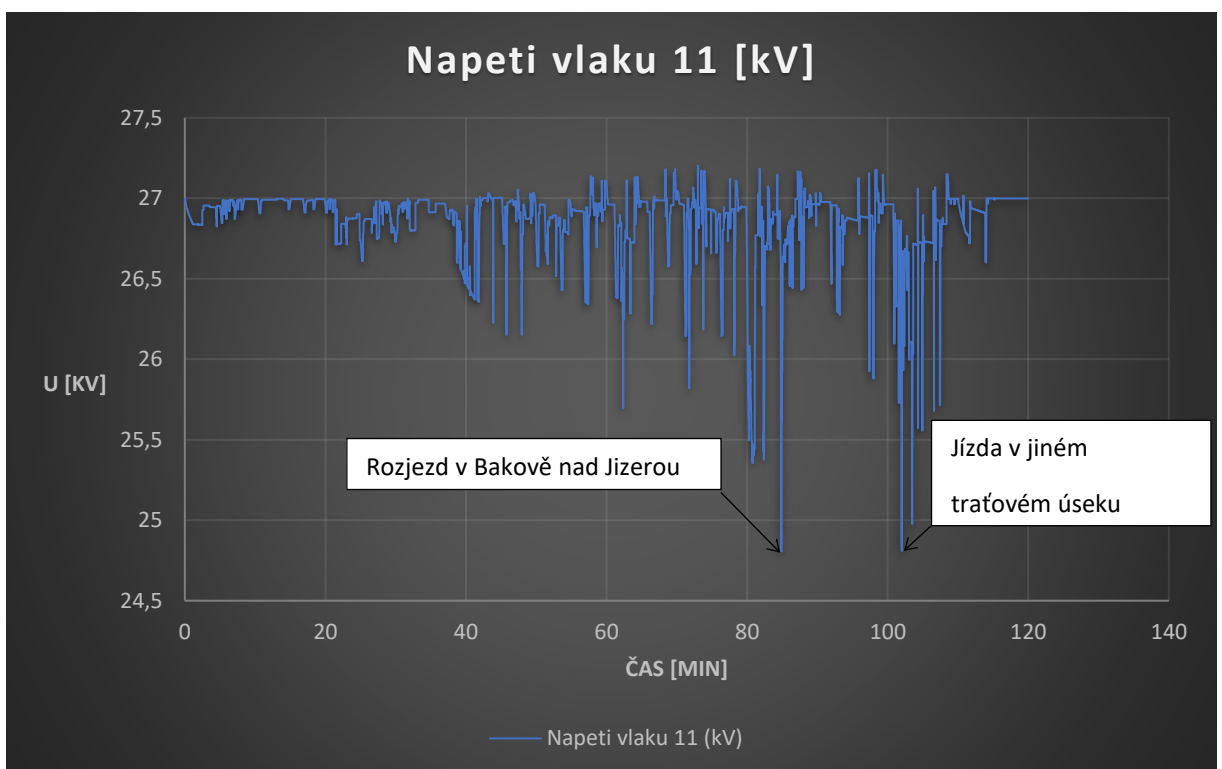
Tabulka znázorňující rozdíl poklesu napětí na sběrači vlaku 10			
Klasická koncepce	Návrh s měničovou napájecí stanicí		
Napětí vlaku 10 [kV]	Napětí vlaku 10 [kV]	Rozdíl [kV]	Rozdíl [%]
24,781	25,322	-0,542	2,186

Tabulka 28 Tabulka znázorňující rozdíl poklesu napětí na sběrači vlaku 10 pro ranní scénář

Poslední vlak, u kterého si porovnáme napětí na sběrači pro oba koncepty v ranním scénáři je vlak číslo 11, který jede z České Lípy do Mladé Boleslavi. V návrhu uvažujícím měničovou napájecí dle obrázku 13 se budeme bavit o jízdě vlaku v oboustranně napájeném traťovém úseku. Zatím, co při jízdě dle obrázku 14 budeme pozorovat jízdu vlaku mezi dvěma jednostranně napájenými úseky.



Obrázek 27 Průběh napětí na sběrači vlaku 11 v ranním scénáři (koncepte s využitím měničové napájecí stanice) [1]



Obrázek 28 Průběh napětí na sběrači vlaku 11 v ranním scénáři (klasická koncepce)

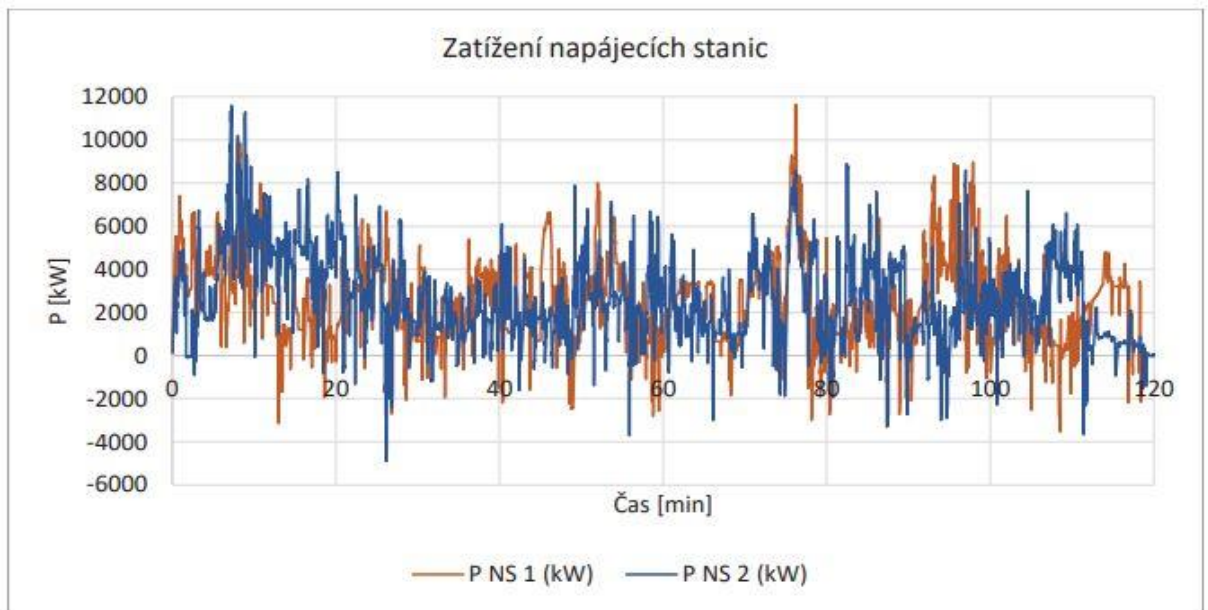
Při pohledu na obrázky 27 a 28 je velmi dobře vidět, jak velký vliv má využití konceptu obsahujícího měničovou napájecí stanici na napětí na sběrači vlaku 11. Díky oboustrannému napájení nenastala při jízdě vlaku situace, kdy by napětí na sběrači pokleslo pod 26 kV. Zatímco u jednostranného napájení pokleslo hned v několika momentech a ve třech časových úsecích dokonce kleslo pod 25 kV.

Vše doplňuje **Tabulka 29**, kde je v prvním sloupci znázorněno minimální vypočtené napětí pro případ klasické koncepce a ve druhém sloupci je znázorněno napětí pro případ užití měničové napájecí stanice.

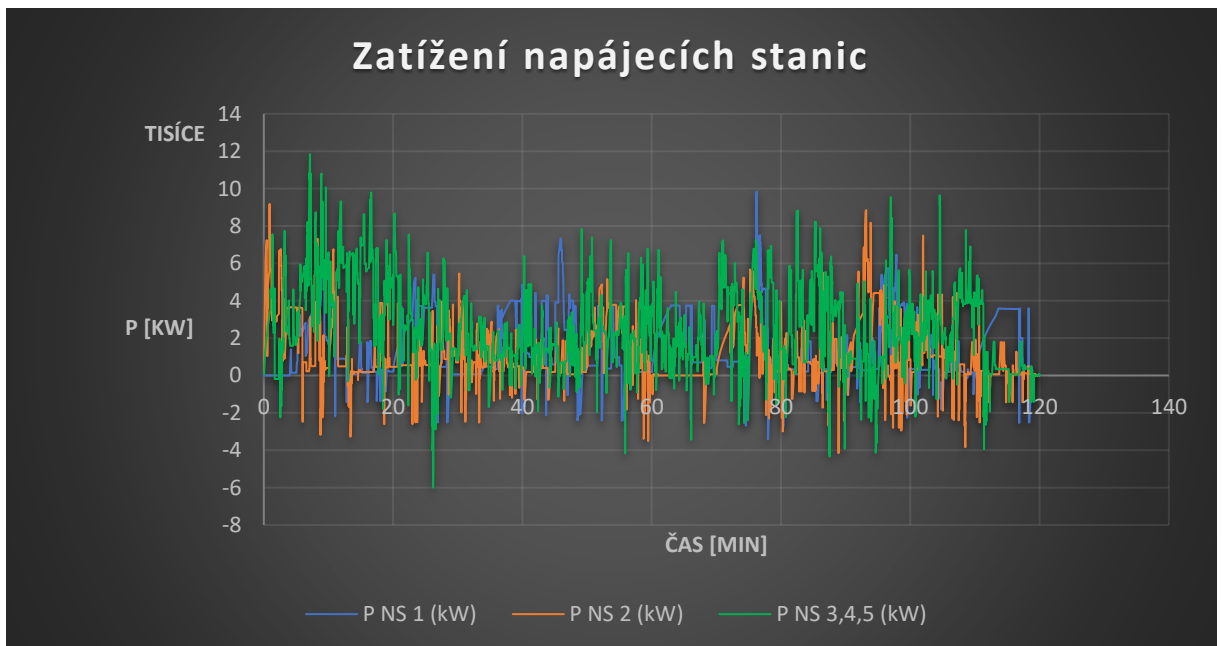
Tabulka znázorňující rozdíl poklesu napětí na sběrači vlaku 11			
Klasická koncepce	Návrh s měničovou napájecí stanicí		
Napětí vlaku 11 [kV]	Napětí vlaku 11 [kV]	Rozdíl [kV]	Rozdíl [%]
24,807	26,083	-1,276	5,145

Tabulka 29 Tabulka znázorňující rozdíl poklesu napětí na sběrači vlaku 11 pro ranní scénář

### Porovnání výsledků z odpoledních scénářů



Obrázek 29 Zatížení napájecích stanic v odpoledním scénáři (koncepte s využitím měničové napájecí stanice) [1]

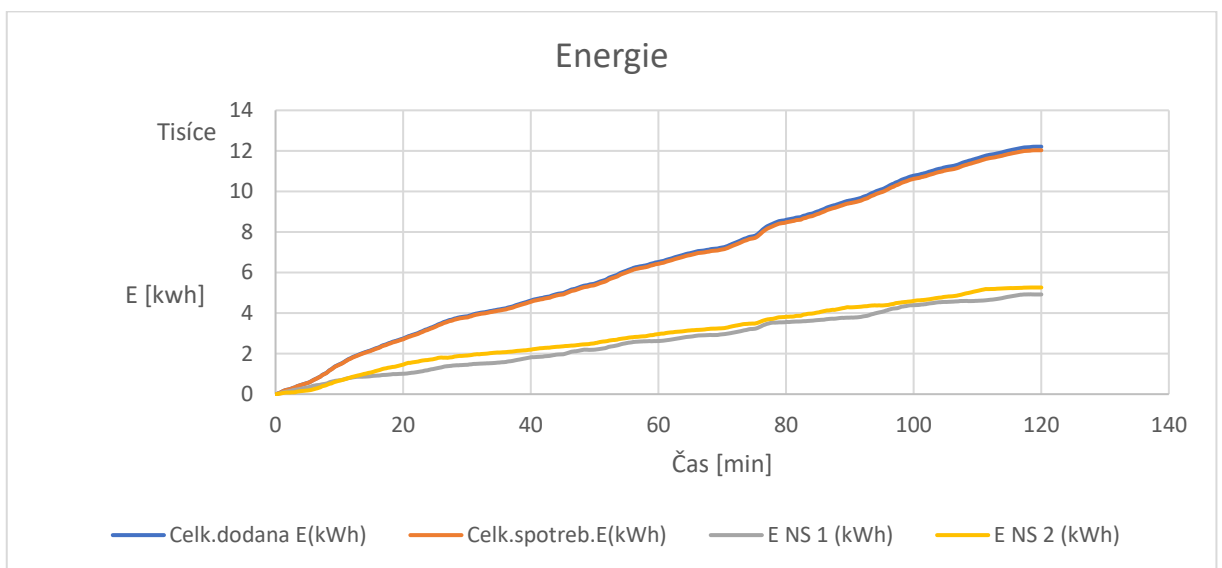


Obrázek 30 Zatížení napájecích stanic v odpoledním scénáři (klasická koncepce)

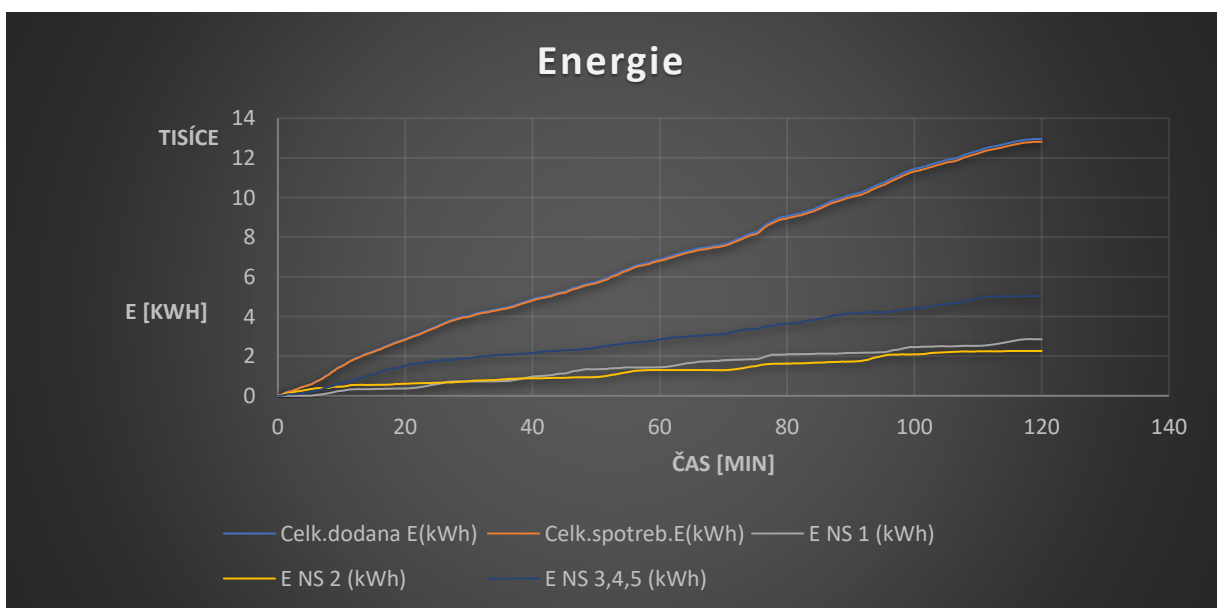
Z obrázků 29 a 30 je patrné to, že zatížení napájecí stanice Česká Lípa je v odpoledním modelu podstatně menší, co se týká absolutní velikosti špičkových hodnot zatížení při koncepci s využitím měničové napájecí stanice. Dále je zde níže uvedena tabulka vypovídající o rozdílu maximálních hodnot zatížení napájecí stanice v České Lípě, jenž se v obou návrzích liší. V prvním sloupečku je výsledek z návrhu klasické koncepce a ve druhém sloupečku je výsledek z návrhu uvažujícím měničovou napájecí stanici.

Tabulka znázorňující rozdíl maximálního zatížení napájecí stanice v České Lípě			
Klasická koncepce	Návrh s měničovou napájecí stanicí		
P NS 3,4,5 [kW]	P NS 2 [kW]	Rozdíl [kW]	Rozdíl [%]
11844,492	11594,744	249,748	2,109

Tabulka 30 Tabulka porovnávající maximální hodnoty zatížení napájecích stanic v České Lípě v odpoledním scénáři



Obrázek 31 Spotřeba energií v odpoledním scénáři (koncepce s využitím měničové napájecí stanice)



Obrázek 32 Spotřeba energií v odpoledním scénáři (klasická koncepce)



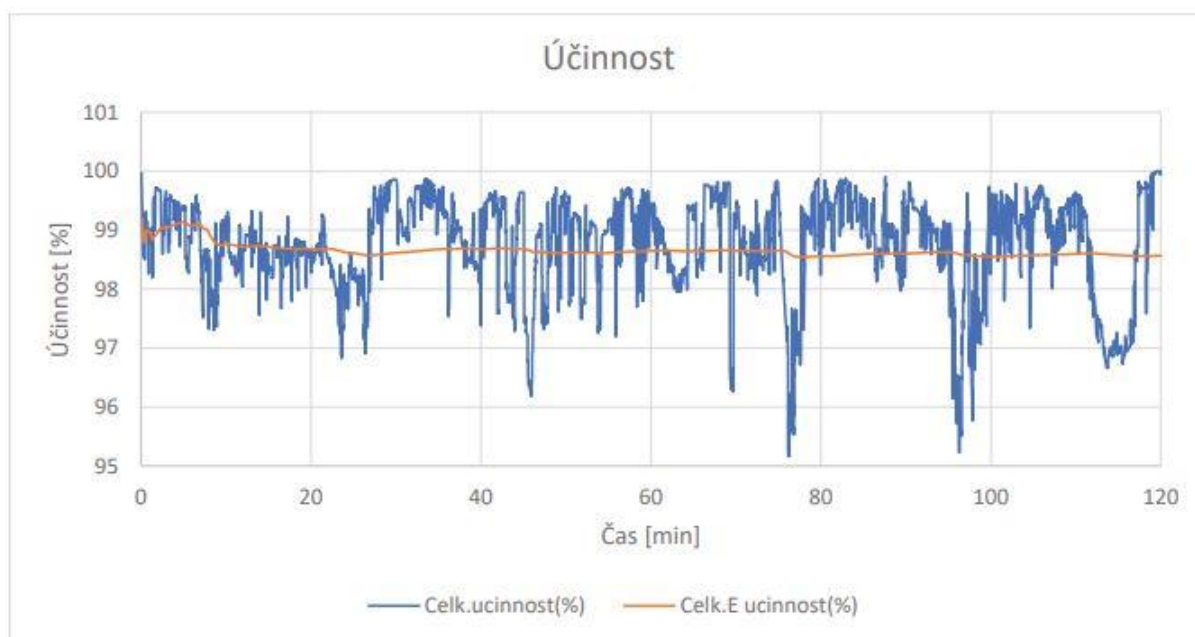
Při pohledu na výsledky analýz nás opět nejvíce zajímá celková dodaná energie **E**, která nám řekne, jestli zařazení měničové napájecí stanice přinese nějakou úsporu energie oproti klasické koncepci. Při pohledu na obrázky 31 a 32, kde jsou z hodnot vykreslené grafy je nám jasné, že zde k nějaké úspoře energie dojde.

Pro bližší určení k jak velké úspoře energie dojde jsme vyjmuli z analýz dvě poslední nejvyšší hodnoty a porovnali je v tabulce 31. V prvním sloupečku je výsledek z návrhu klasické koncepce a ve druhém sloupečku je výsledek z návrhu uvažujícím měničovou napájecí stanicí v České Lípě a spojitě napájení.

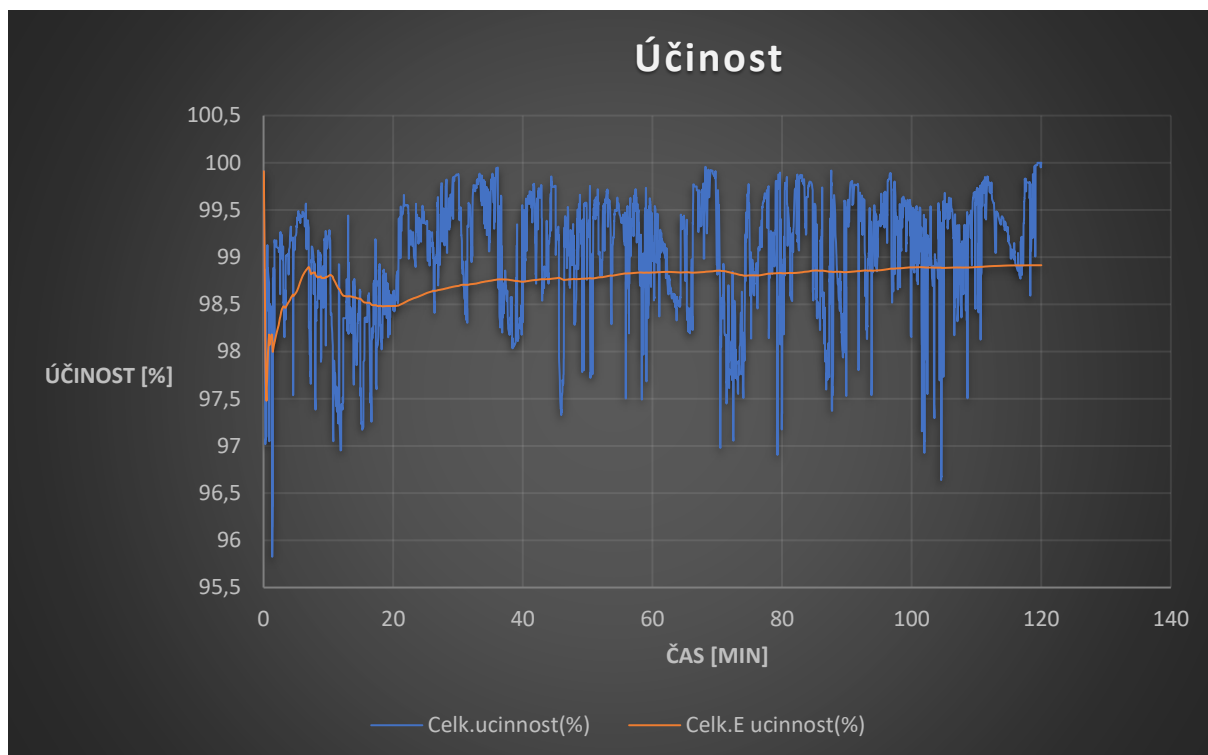
Tabulka znázorňující rozdíl v celkové dodané energii			
Klasická koncepce	Návrh s měničovou napájecí stanicí		
Celk.dodana E [kWh]	Celk.dodana E [kWh]	Rozdíl [kW]	Rozdíl [%]
12953,061	12206,657	746,404	5,762

Tabulka 31 Tabulka porovnávající celkové dodané energie v obou analýzách v odpoledním scénáři

Vzhledem ke shodě závěrů v ranním scénáři s odpoledním lze konstatovat, že zařazení měničové napájecí stanice přinese potenciální úsporu energie. V našem případě k tomu došlo i přes vhodnější rozmístění napájecích stanic klasické koncepce a skutečnost, že jsme uvažovali jednu napájecí stanicí navíc na nejvíce zatíženém úseku v Nymburce.



Obrázek 33 Graf průběhu účinnosti v odpoledním scénáři (koncepce s využitím měničové napájecí stanice) [1]



Obrázek 34 Graf průběhu účinností v odpoledním scénáři (klasická koncepce)

Grafy na obrázcích 33 a 34 nám znázorňují účinnost napájení. Modrá křivka vypočtena z výkonů nám znázorňuje momentální účinnost v daném okamžiku, která velmi často kolísá v tomto případě dokonce více, jak při ranním scénáři. Druhá křivka vypočtena z energií nám znázorňuje celkovou účinnost do daného okamžiku a zde se nám opět ukázalo, že celková účinnost je lepší v případě klasické koncepce, jak dokládají i hodnoty v tabulce 32 níže, kde v prvním sloupečku je hodnota návrhu klasické koncepce a ve druhém je výsledek z návrhu uvažující měničovou napájecí stanici. Je dobré zopakovat, že ta lepší účinnost je zcela jistě zapříčiněna vhodnějším návrhem rozmístění napájecích stanic v případě klasické koncepce, kde je uvažována navíc napájecí stanice v Nymburce. Napájecí stanice v Nymburce nám díky kratší vzdálenosti efektivněji napájí traťový úsek jedna znázorněný na obrázku 14 a pomáhá k efektivnějšímu přenosu rekuperované energie. V prvním sloupečku je výsledek z návrhu klasické koncepce a ve druhém sloupečku je výsledek z návrhu uvažujícím měničovou napájecí stanici.

Tabulka znázorňující rozdíl v celkové E účinnosti		
Klasická koncepce	Návrh s měničovou napájecí stanicí	
Celk.E účinnost [%]	Celk.E účinnost [%]	Rozdíl [%]
98,915	98,567	0,348

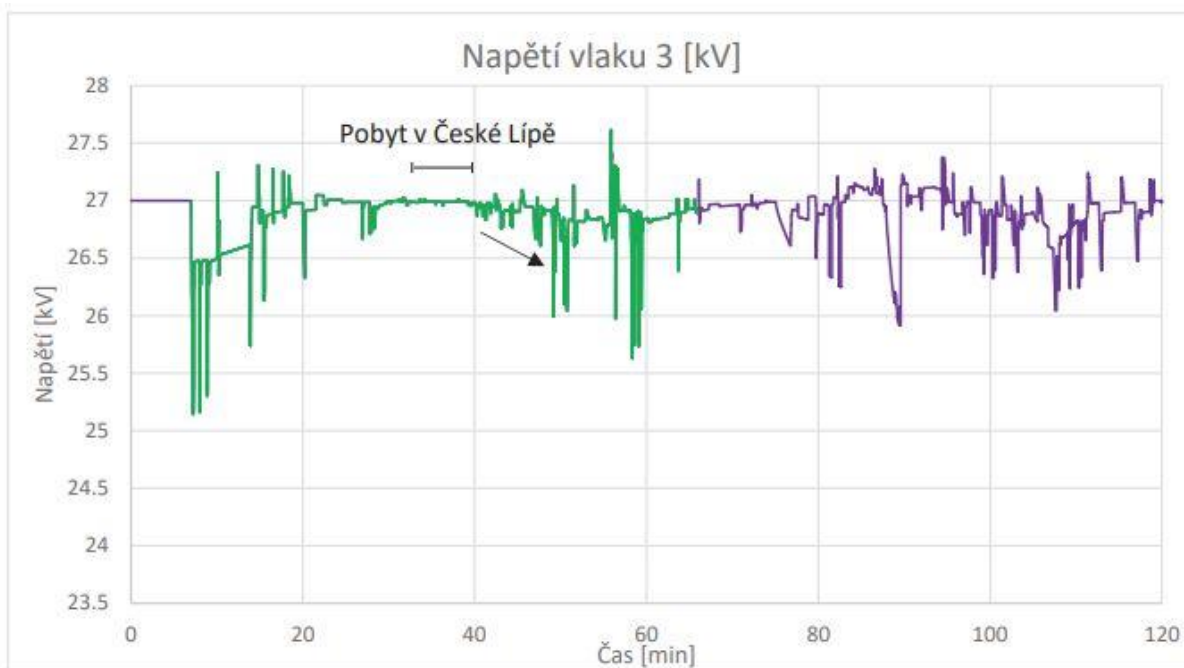
Obrázek 35 Tabulka znázorňující rozdíl celkové E účinnosti v odpoledním scénáři

Vzhledem ke shodě závěrů v ranním scénáři s odpoledním lze konstatovat, že přidání napájecí stanice v Nymburce se značně zlepšil celková E účinnost. V našem případě jsme dokonce v tomto ohledu překonali koncept, kde byla použita měničová napájecí stanice.

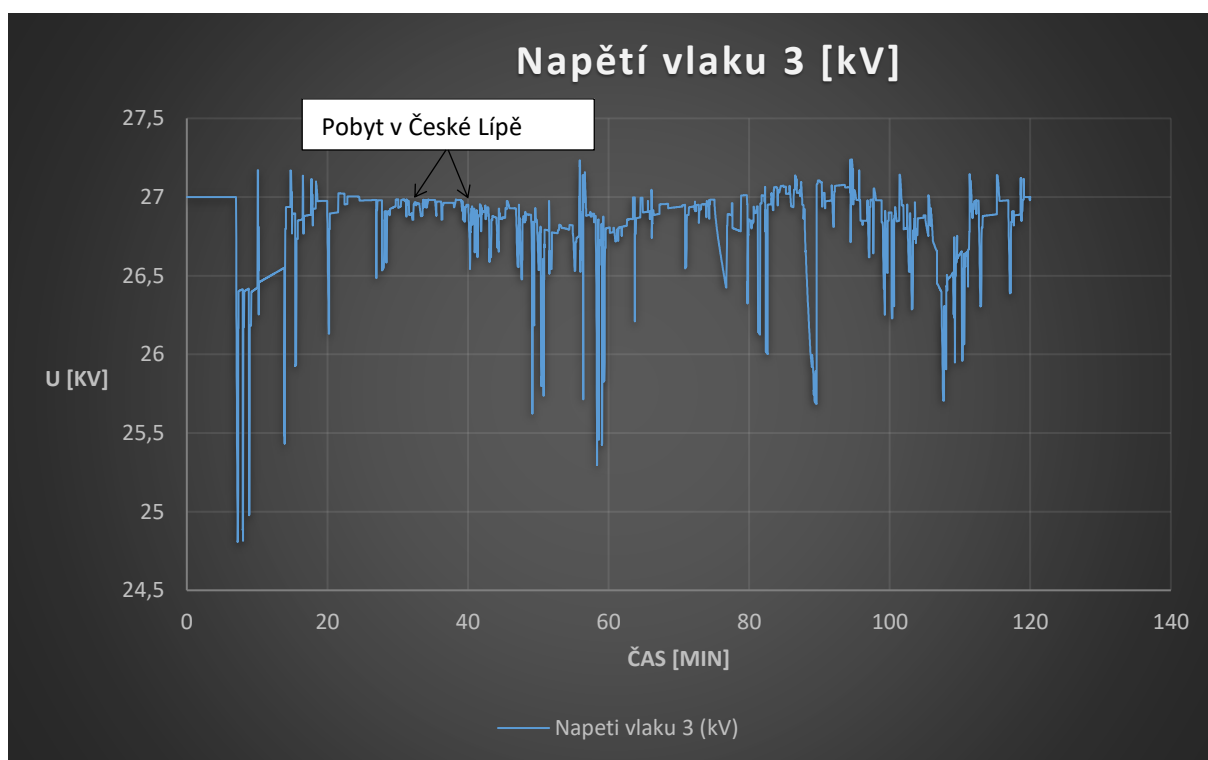
Pro úplnost si stejně jako v ranním scénáři porovnáme i další grafy sdělující nám napětí na sběračích vybraných vlaků během jízdy v odpoledním modelu. Nejvíce nás v tomto případě bude znovu zajímat, jak se projeví na napětí na sběračích skutečnost, že v České Lípě není jako v případě kolegova návrhu uvažována měničová napájecí stanice, ale stanice klasické koncepce. Dále nás bude zajímat, jak moc pozitivně se projeví umístění klasické napájecí stanice v Nymburce oproti návrhu, kde uvažována nebyla. Tím si ověříme, zda jsou naše závěry z ranního scénáře správné.

Opět tedy budeme uvažovat vlaky stejné jako kolega Žižlavský ve své práci. Těmi vybranými vlaky jsou vlaky 3,24 a 37. Následně zdůvodníme, proč jsou pro nás tyto vlaky zajímavé.

Vlak 3 je rychlík jedoucí z Děčína do Jablonného v Podještědí, což jsou z pohledu napájení dva jednostranně napájené úseky. My zde budeme moci posoudit, jak moc tvrdý napěťový zdroj je měničová napájecí stanice v porovnání se stanicí klasické koncepce.



Obrázek 36 Průběh napětí na sběrači vlaku 3 v odpoledním scénáři (koncepte s využitím měničové napájecí stanice) [1]



Obrázek 37 Průběh napětí na sběrači vlaku 3 v odpoledním scénáři (klasická koncepce)

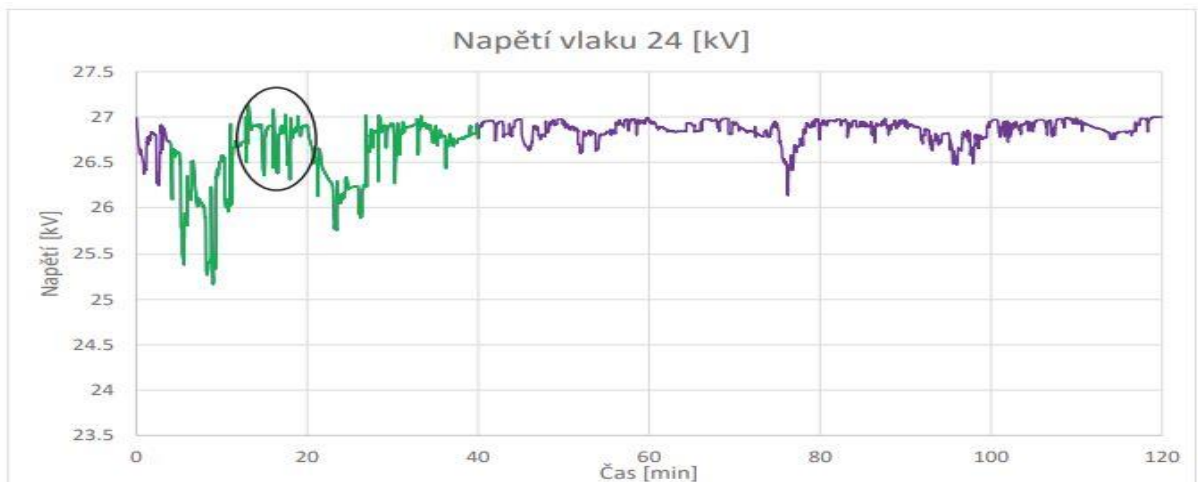
Při pohledu na obrázky 36 a 37 je na první pohled vidět, jak velký vliv má měničová napájecí stanice na tvrdost napětí na sběrači vlaku 3, kde vidíme zachování míst největších napět'ových poklesů v daných časech, ale v případě koncepce s použitím, kde je použita měničová napájecí stanice jsou poklesy podstatně menší.

**Tabulka 34** dokládá přesněji pro porovnání poklesy napětí na sběrači vlaku 3 pro obě koncepce. V prvním sloupečku je minimální vypočtené napětí za použití klasické koncepce a ve druhém je minimální napětí vypočtené při použití měničové napájecí stanice.

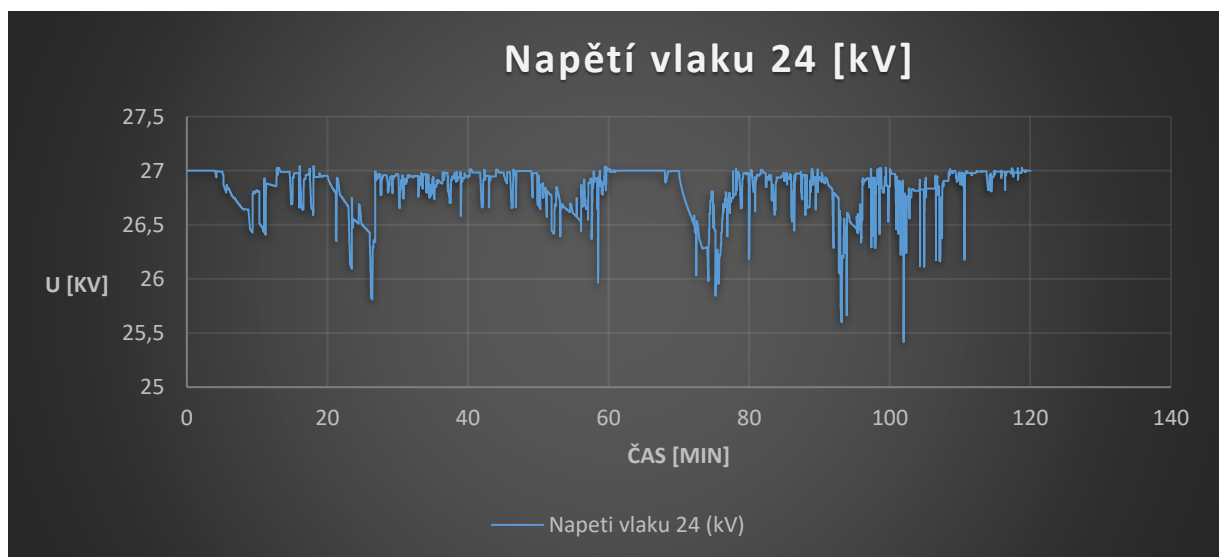
Tabulka znázorňující rozdíl poklesu napětí na sběrači vlaku 3			
Klasická koncepce	Návrh s měničovou napájecí stanicí		
Napětí vlaku 3 [kV]	Napětí vlaku 3 [kV]	Rozdíl [kV]	Rozdíl [%]
24,806	25,143	-0,337	1,359

Tabulka 32 Tabulka znázorňující rozdíl poklesu napětí na sběrači vlaku 3 pro odpolední scénář

Vlak 24 je osobní vlak jedoucí z Nymburka do Mladé Boleslavi. Opět budeme prověřovat význam umístění napájecí stanice v Nymburce a sledovat, jak moc poklesne napětí na sběrači poblíž Nymburka.



Obrázek 38 Průběh napětí na sběrači vlaku 24 v odpoledním scénáři (koncepce s využitím měničové napájecí stanice) [1]



Obrázek 39 Průběh napětí na sběrači vlaku 24 v odpoledním scénáři (klasická koncepce)

Při pohledu na obrázky 38 a 39 je na první pohled vidět, jak velký vliv můžou mít na tvrdost napětí na sběrači vlaku 24 další vlakové soupravy nacházející se ve stejném úseku jejich vlivem napětí prudce klesá. Ovšem díky další napájecí stanici v Nymburce, klesne na obrázku 39 v oblasti poblíž Nymburka podstatně méně, než na obrázku 38.

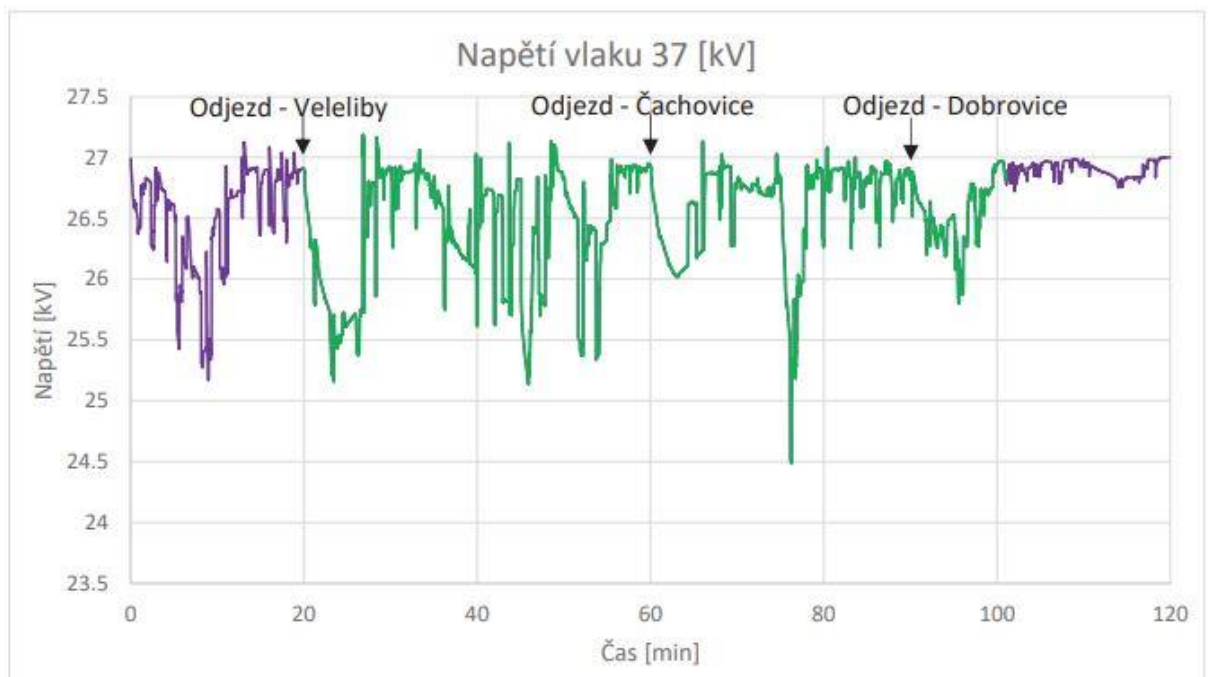
Vše doplňuje **Tabulka 33**, kterou je potřeba chápat ve správném kontextu výše zmíněného. V prvním sloupečku je minimální vypočtené napětí za použití klasické koncepce a ve druhém je minimální vypočtené napětí při použití měničové napájecí stanice.

Tabulka znázorňující rozdíl poklesu napětí na sběrači vlaku 24			
Klasická koncepce	Návrh s měničovou napájecí stanicí		
Napětí vlaku 24 [kV]	Napětí vlaku 24 [kV]	Rozdíl [kV]	Rozdíl [%]
25,416	25,168	0,247	0,973

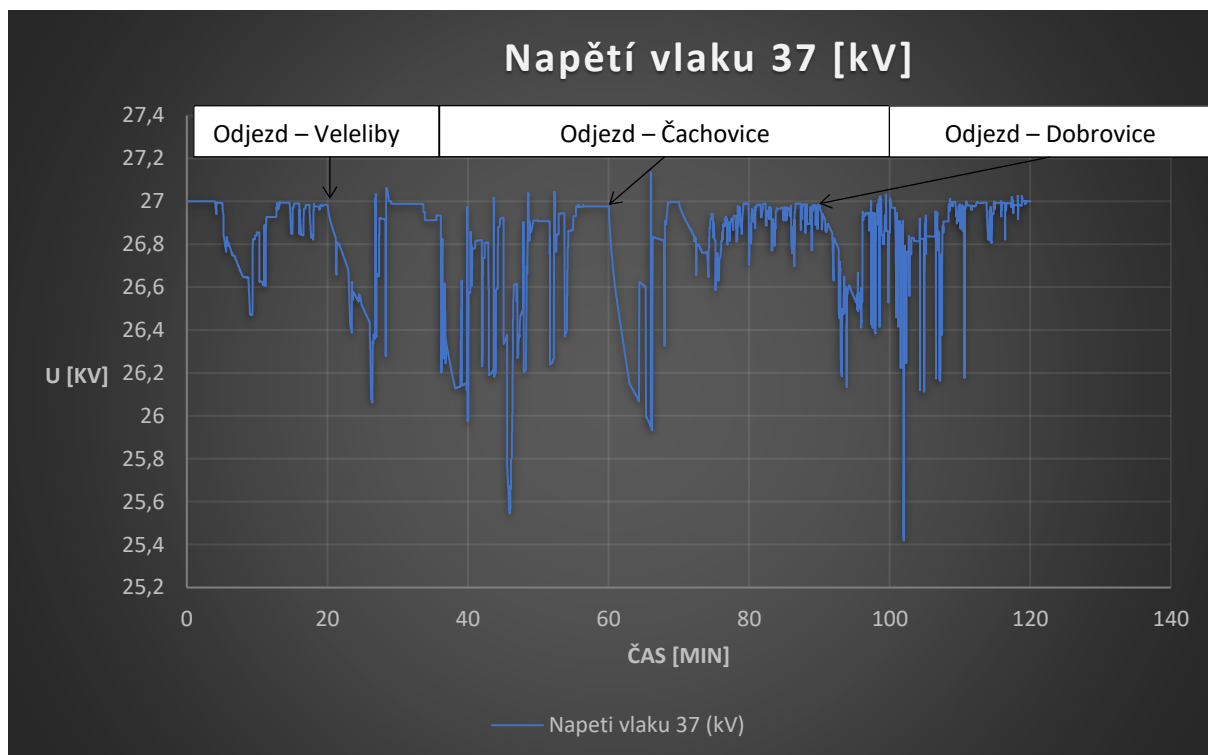
Tabulka 33 Tabulka znázorňující rozdíl poklesu napětí na sběrači vlaku 24 pro odpolední scénář

V tabulce 33 jsou dvě minimální hodnoty napětí nepříliš lišící se na rozdíl od ranního modelu, a proto je důležité upozornit, že minimální hodnota v případě koncepce, kde je použita měničová stanice, je hlavně z důvodu vzdálenosti od napájecí stanice v Mladé Boleslavi viz. Obrázek 38, zatímco pokles na obrázku 39 je hlavně z důvodu celkového zatížení traťového úseku poblíž Mladé Boleslavi a absence spojitého napájení.

Posledním vybraným vlakem je vlak 37, což je nákladní souprava jedoucí z Velelib do Mladé Boleslavi. Vlak je zde nucen dvakrát zastavovat, a to v Čachovicích a Dobrovicech.



Obrázek 40 Průběh napětí na sběrači vlaku 37 v odpoledním scénáři (koncepce s využitím měničové napájecí stanice) [1]



Obrázek 41 Průběh napětí na sběrači vlaku 37 v odpoledním scénáři (klasická koncepce)

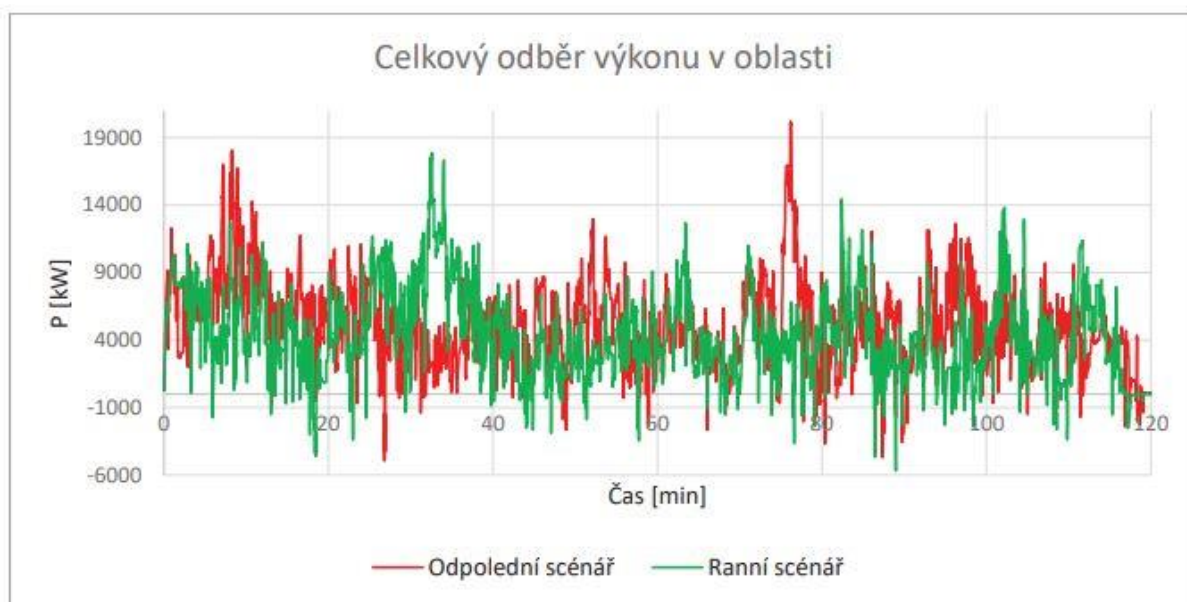
Při pohledu na obrázky 40 a 41 je vidět, jak velký vliv má na tvrdost napětí doplněná napájecí stanice konvenčního typu v Nymburce. Je zde vidět z grafu na obrázku 41, že poloha poklesu napětí se příliš nemění od grafu na obrázku 40, ale díky napájecí stanici v Nymburce nikdy nepoklesne napětí, tak moc jako u návrhu, kde uvažována není.

Pro doplnění je zde přiložena **Tabulka 34**, která dokládá přesná čísla k výše zmíněné skutečnosti. V prvním sloupečku je minimální vypočtené napětí za použití klasické koncepce a ve druhém je minimální vypočtené napětí při použití měničové napájecí stanice.

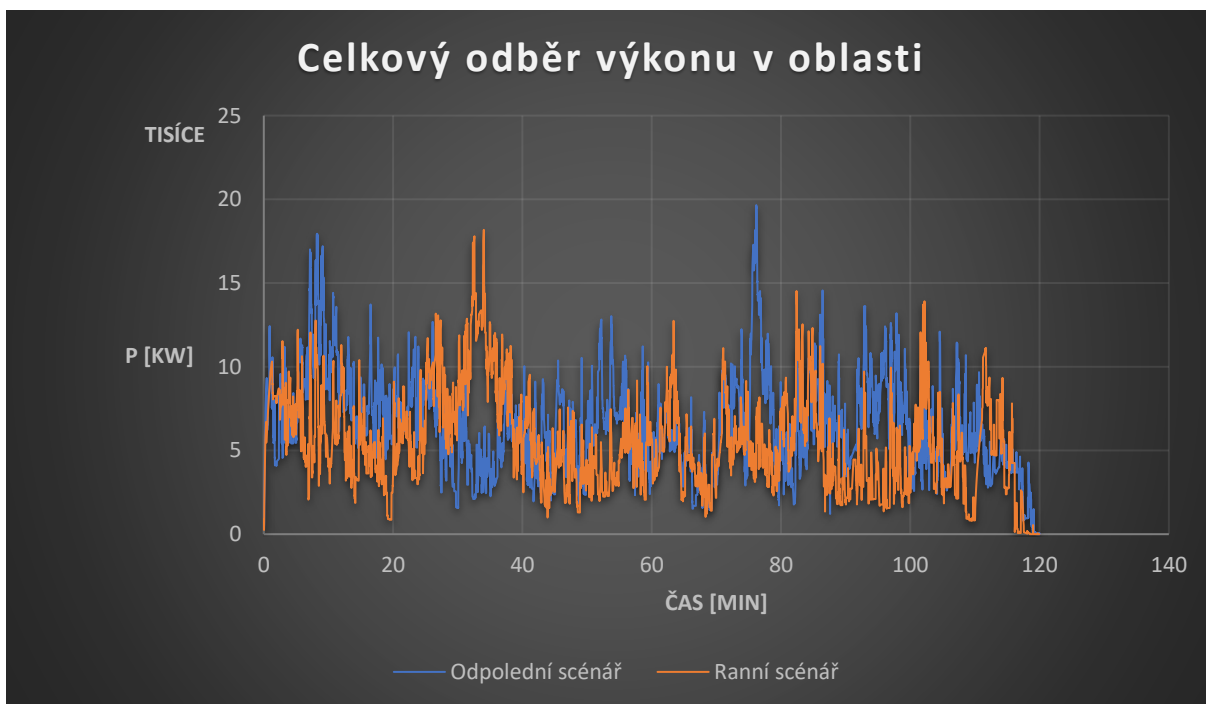
Tabulka znázorňující rozdíl poklesu napětí na sběrači vlaku 37			
Klasická koncepce	Návrh s měničovou napájecí stanicí		
Napětí vlaku 37 [kV]	Napětí vlaku 37 [kV]	Rozdíl [kV]	Rozdíl [%]
25,419	24,486	0,933	3,669

Tabulka 34 Tabulka znázorňující rozdíl poklesu napětí na sběrači vlaku 37 pro odpolední scénář

Pro kontrolu správnosti zadání jízdního řádu náležitě našim modelů pro různé koncepty návrhu vygeneruje grafy znázorňující celkový odběr výkonu v dané oblasti. Na základě polohy jeho špičkových hodnot, které jsou dány jízdou vlaků v daných modelech můžeme poznat, zda byl jízdní řád zadán správně, či nikoli.



Obrázek 42 Porovnání celkového odebíraného výkonu u obou scénářů (koncepte s využitím měničové napájecí stanice) [1]



Obrázek 43 Porovnání celkového odebíraného výkonu u obou scénářů (klasická koncepce)

Pro kontrolu správnosti zadání jsme porovnali průběhy grafů na obrázcích 42 a 43. Z tohoto se dá dojít k závěru vzhledem k poloze výkonových špiček, že jízda vlaku po dané trati byla zadána shodně. Lišit se budou jenom maximální hodnoty na požadovaný výkon, kde budou započítány i ztráty a ty se budou mezi návrhy měnit.

Pro doplnění přikládáme **Tabulku 35** s maximálními vypočtenými hodnotami výkonu.

Koncepte s využitím měničové napájecí stanice		Klasická koncepce	
Odpolední scénář	Ranní scénář	Odpolední scénář	Ranní scénář
20323,603	18510,107	19656,329	18176,385

Tabulka 35 Tabulka udávající maximální odebírané výkony ranních a odpoledních modelů

## 4. Porovnání systémů napájecích stanic z hlediska zkratových poměrů

Jako závěrečný bod této práce si analyzujeme chování napájecích stanic při zkratu, kde budeme sledovat průběh vybraných veličin v závislosti na vzdálenosti napájecí od místa zkratu. Jako první si vymodelujeme situace, kdy zde budeme uvažovat jednostranné napájení traťového úseku s tím, že provedeme tu samou analýzu, jak pro napájecí stanici klasické koncepce (TNS), tak pro měničovou napájecí stanici (MNS). Druhým bodem bude nasimulování zkratů na trati, která je napájena spojitě z kombinace klasické napájecí stanice a měničové napájecí stanice. Budeme uvažovat zkrat před klasickou napájecí stanicí, mezi napájecími stanicemi a za měničovou napájecí stanicí. Pro analýzu použijeme modifikovanou verzi výpočetního modelu, který je vyvíjen na katedře **KEEZ**. Výpočetní model uvažuje parametry napájecích stanic viz. **Tabulka 36** a poměrnou impedanci trakčního vedení, která je  $0.26+j*0.55 \Omega/\text{km}$ .

### 4.1 Zkrat při jednostranném napájení trati

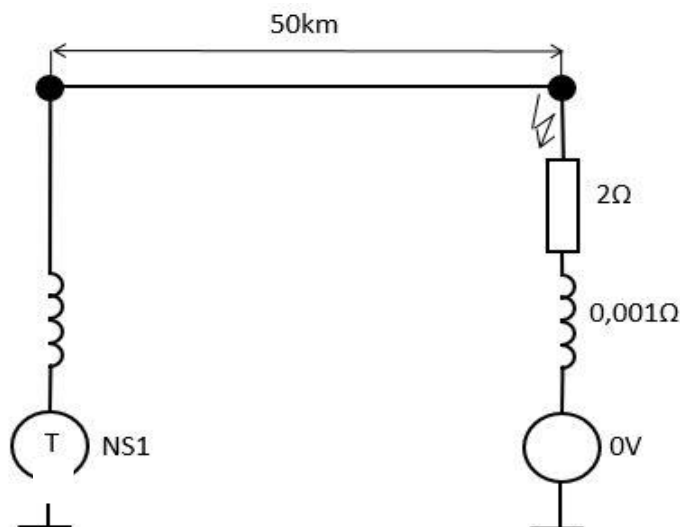
Zkrat na jednostranně napájeném úseku budeme simulovat, jako by se na trati kromě napájecí stanice, která dodává potřebný výkon nacházela další napájecí stanice s nulovým napětím a impedancí rovnou vlastnostem zkratu. V tomto případě zkrat uvažujeme jako čistě činnou impedanci, tedy odpor o velikosti  $2 \Omega$ .

Napájecí stanice	Uzel č.	Impedance NS (Ohm)	Napětí NS (V)	Mezní výkon NS (MW)	Reg./uhel NS (°)
1	1	$0.001+j*0.001$	27000	10	1000
2	2	$2.0+j*0.001$	0	10	0

Tabulka 36 Zadání napájecích stanic

#### Zkrat na jednostranně napájeném úseku stanicí klasické/měničové koncepce:

Pro upřesnění zadání si níže vložíme schéma znázorňující délku trati, kde budeme uvažovat zkrat po 5 km dlouhých skocích od stanice až na konec traťového úseku.

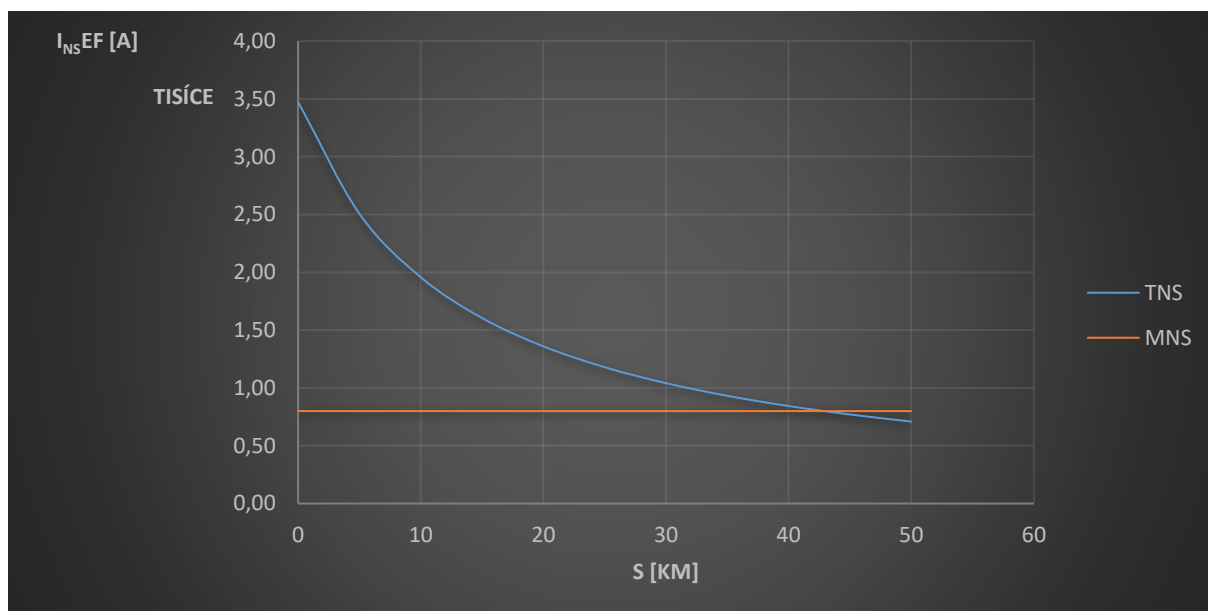


Obrázek 44 Schéma soustavy pro modelování zkratu na jednostranně napájeném úseku



### Zjišťované závislosti:

1)  $I_{NSef} = f(s)$



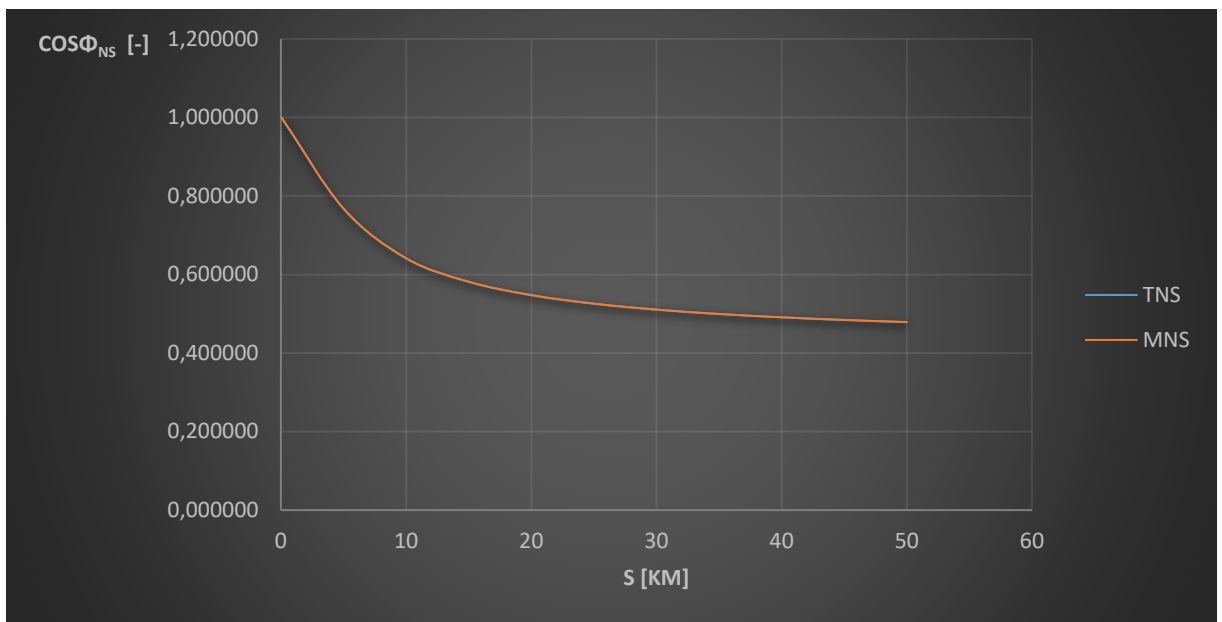
Obrázek 45 Závislost proudu napájecí stanice na vzdálenosti zkratu

	s [km]	0,05	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
TNS	$I_{NSef}$ [A]	3464,54	2507,11	1957,78	1605,22	1360,00	1179,64	1041,46	932,23	843,71	770,53	709,04
MNS	$I_{NSef}$ [A]	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800

Tabulka 37 Tabulka zjištěných hodnot závislosti proudu napájecí stanice na vzdálenosti zkratu

Za povšimnutí stojí z průběhů grafu na obrázku 45 a hodnot v tabulce 37 tvrdost měničové napájecí stanice jako zdroje proudu, kde máme proud regulací omezen na hodnotu 800 A oproti napájecí stanici klasické koncepce.

2)  $\cos\varphi_{NS}=f(s)$



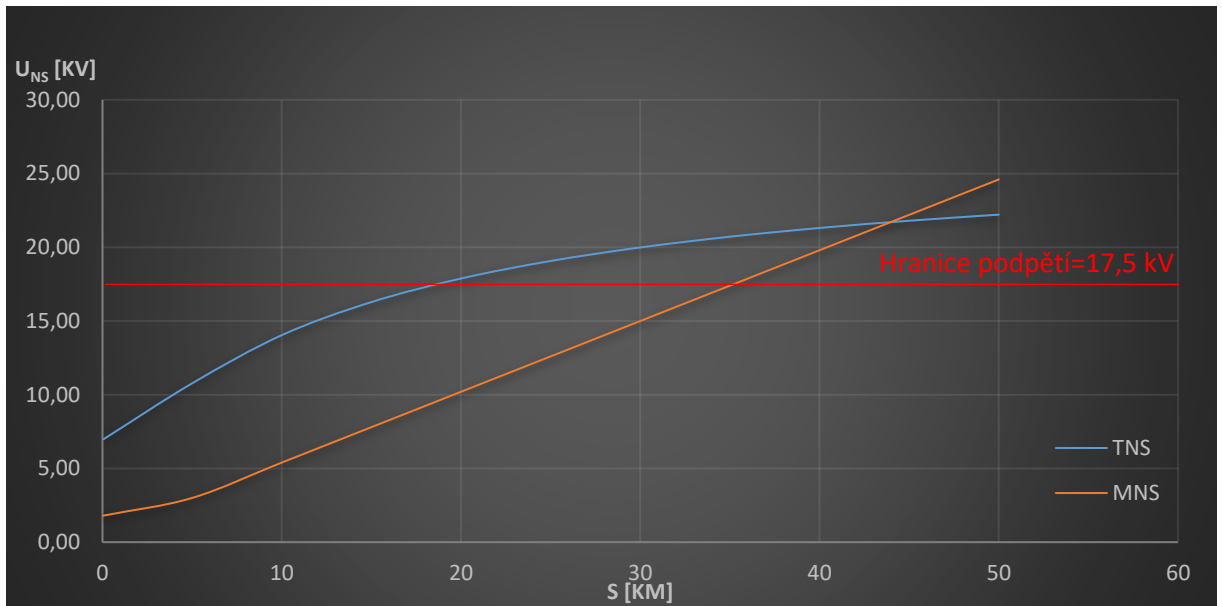
Obrázek 46 Závislost účinníku napájecí stanice na vzdálenosti zkratu

	s [km]	0,05	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
TNS	$\cos\varphi_{NS}$ [-]	1,00	0,77	0,64	0,58	0,55	0,53	0,51	0,50	0,49	0,48	0,48
MNS	$\cos\varphi_{NS}$ [-]	0,9999	0,76811	0,64149	0,5817	0,54762	0,52579	0,51064	0,4995	0,491	0,4843	0,4788

Tabulka 38 Tabulka zjištěných hodnot závislosti účinníku napájecí stanice na vzdálenosti zkratu

Z pohledu účinníku se napájecí stanice měničové koncepce tváří, jako napájecí stanice klasické koncepce, kdy vidíme, jak s nárůstem vzdálenosti se mění charakter odebírané energie, což má vliv na právě zmiňovaný účinník. Shodné účinníky v obou případech odpovídají tomu, že účinník je dán impedancí zátěže, tj. vedení a zkratu, nezávisí tedy na charakteru zdroje.

3)  $U_{NS}=f(s)$



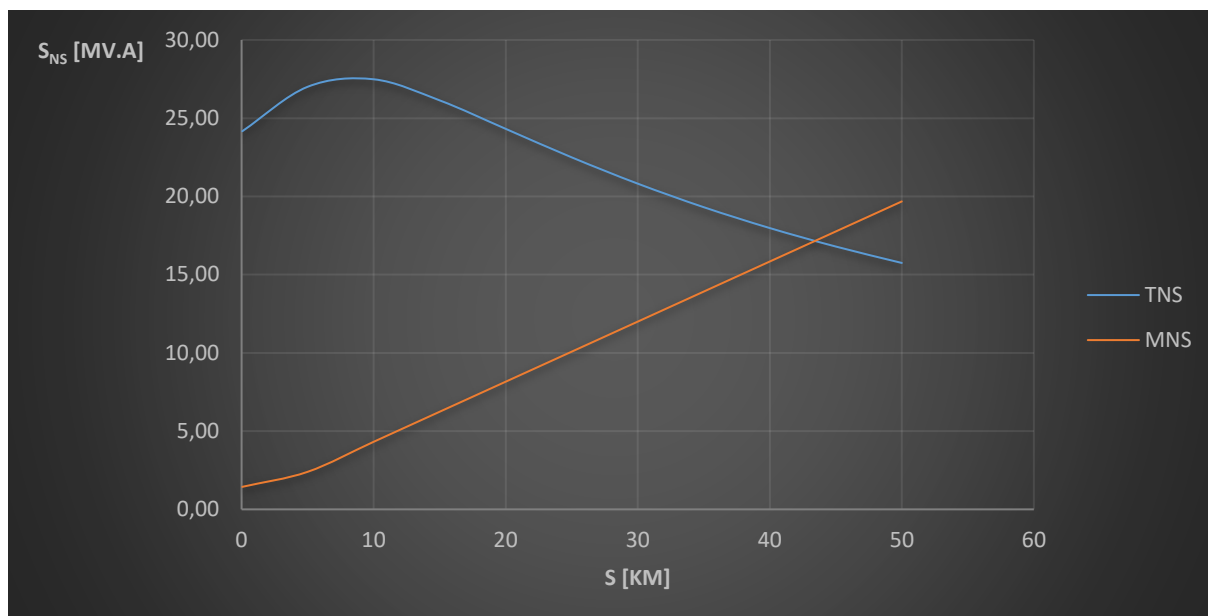
Obrázek 47 Závislost napětí napájecí stanice na vzdálenosti zkratu

s [km]	0,05	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
TNS $U_{NS}$ [kV]	6,97	10,77	14,04	16,28	17,88	19,07	19,99	20,72	21,31	21,80	22,21
MNS $U_{NS}$ [kV]	1,7991	2,99902	5,39894	7,7989	10,1989	12,5989	14,9989	17,399	19,799	22,199	24,599

Tabulka 39 Tabulka zjištěných hodnot závislosti napětí napájecí stanice na vzdálenosti zkratu

Z grafu, který je na obrázku 47 je poměrně dobře vidět rozdíl charakteru napájecích stanic, kde si můžeme povšimnout, že v případě jednostranného napájení stanicí klasické koncepce může dojít k maskování zkratu, jako podpětí už při vzdálenosti zhruba 20 km od napájecí stanice. Zatímco v případě měničové napájecí stanice k tomu dojde až na vzdálenosti zkratu od stanice zhruba 35km. Hranice bezpečného rozeznání zkratu bude samozřejmě záviset na impedanci zkratu a velikosti proudového omezení měničové napájecí stanice.

4)  $S_{NS}=f(s)$



Obrázek 48 Závislost zdánlivého výkonu napájecí stanice na vzdálenosti zkratu

s [km]	0,05	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
TNS $S_{NS}$ [MV.A]	24,16	27,00	27,49	26,14	24,32	22,50	20,82	19,31	17,98	16,80	15,75
MNS $S_{NS}$ [MV.A]	1,4393	2,39921	4,31915	6,2391	8,15914	10,0791	11,9991	13,919	15,839	17,759	19,679

Tabulka 40 Tabulka zjištěných hodnot závislosti zdánlivého výkonu napájecí stanice na vzdálenosti zkratu

Z průběhů grafu na obrázku 48 je dobře vidět, jak schopnost měničové napájecí stanice omezit proud zásadně omezila i zdánlivý výkon, který napájecí stanice při zkratu vydá.

Zkraty při jednosměrném napájení transformační(TNS) a měničová(MNS) napájecí stanice												
	s [km]	0,05	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
TNS	$I_{NSef}$ [A]	3464,54	2507,11	1957,78	1605,22	1360,00	1179,64	1041,46	932,23	843,71	770,53	709,04
	$\cos\varphi_{NS}$ [-]	0,999900	0,768107	0,641487	0,581658	0,547624	0,525794	0,510636	0,499508	0,490996	0,484277	0,478840
	$U_{NS}$ [kV]	6,97	10,77	14,04	16,28	17,88	19,07	19,99	20,72	21,31	21,80	22,21
	$S_{NS}$ [MV.A]	24,16	27,00	27,49	26,14	24,32	22,50	20,82	19,31	17,98	16,80	15,75
MNS	$I_{NSef}$ [A]	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
	$\cos\varphi_{NS}$ [-]	0,999900	0,768107	0,641486	0,581658	0,547624	0,525794	0,510636	0,499508	0,490996	0,484277	0,478840
	$U_{NS}$ [kV]	1,80	3,00	5,40	7,80	10,20	12,60	15,00	17,40	19,80	22,20	24,60
	$S_{NS}$ [MV.A]	1,44	2,40	4,32	6,24	8,16	10,08	12,00	13,92	15,84	17,76	19,68

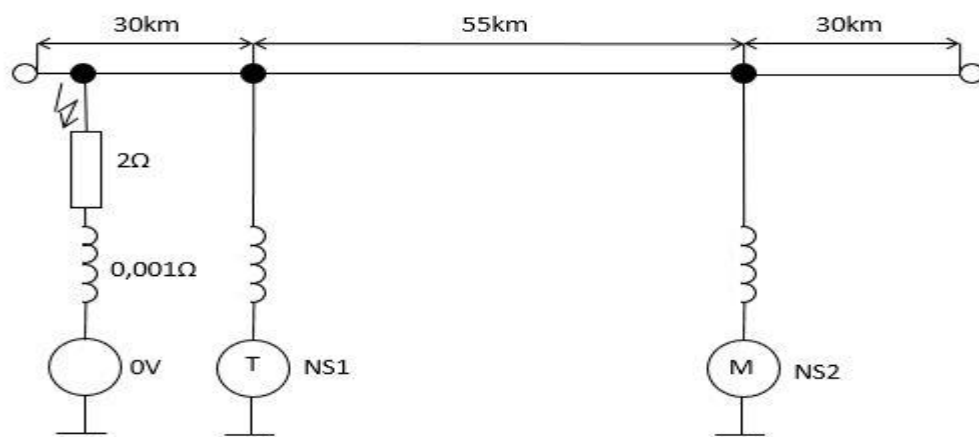
Tabulka 41 Přehledová tabulka zjištěných parametrů zkratu pro napájecí stanici klasické/měničové

## 4.2 Zkrat při spojitém napájení trati kombinací měničové a klasické napájecí stanice

V této části práce se zaměříme na průběh zkratu v případě kombinovaného napájení za pomoci měničové a klasické napájecí stanice. Budeme uvažovat zkrat před klasickou napájecí stanicí (TNS), mezi napájecími stanicemi a za měničovou napájecí stanicí (MNS).

### Zkrat na úseku před stanicí klasické koncepce:

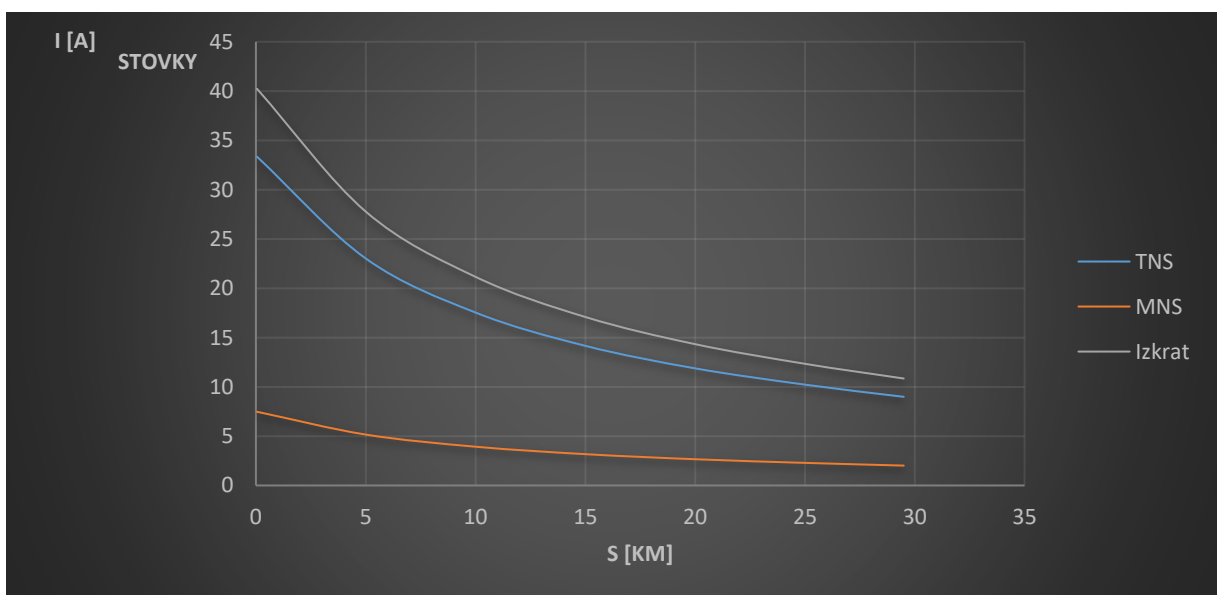
Pro upřesnění zadání si níže vložíme schéma znázorňující délku trati, kde budeme uvažovat zkrat po 5 km dlouhých skocích od stanice až na konec traťového úseku. Vzdálenost na vodorovné ose v grafech tedy bereme od konvenční napájecí stanice k měničové napájecí stanici.



Obrázek 49 Schéma soustavy pro modelování zkratu před stanicí klasické koncepce

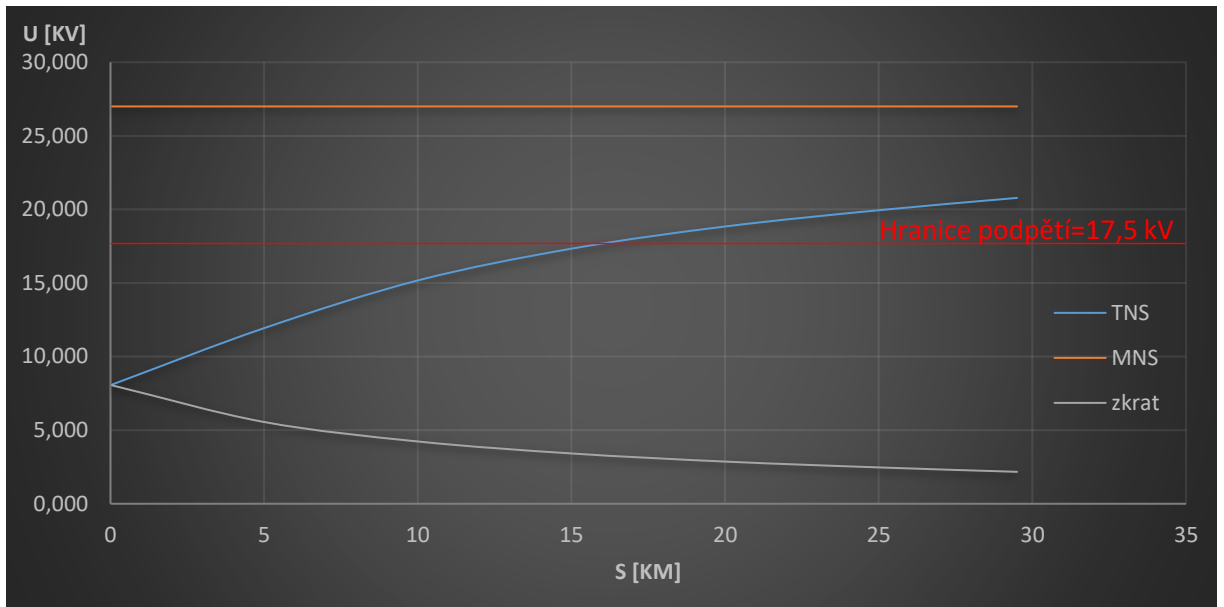
### Zjišťované závislosti:

1)  $I=f(s)$



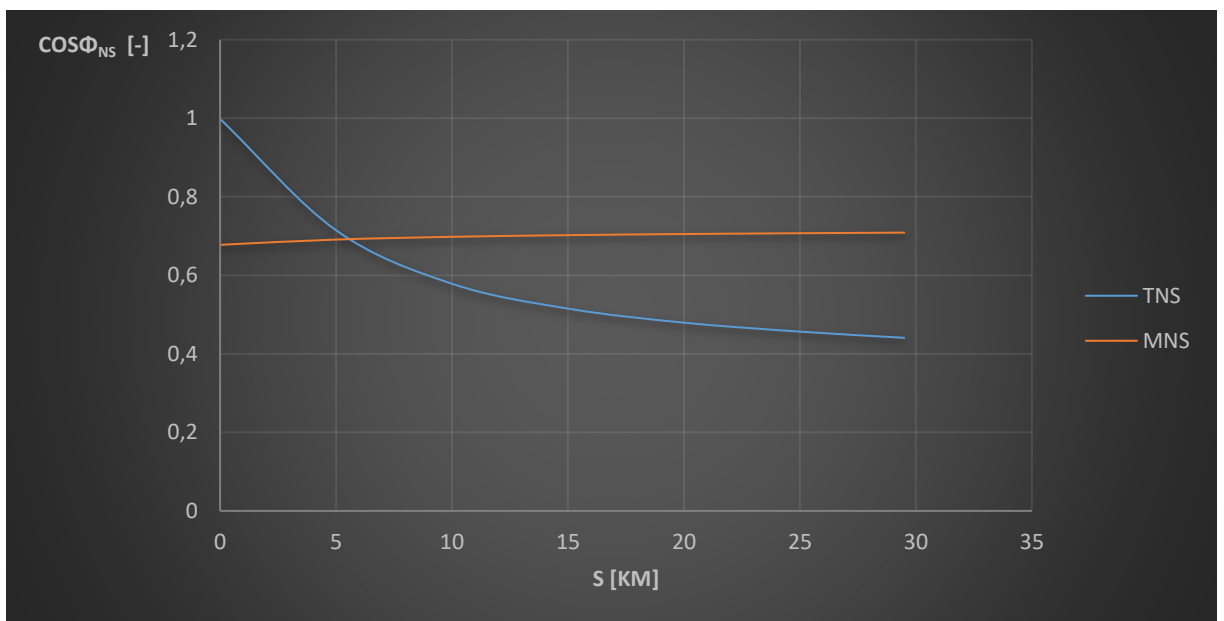
Obrázek 50 Závislost proudu na vzdálenosti zkratu

2)  $U=f(s)$



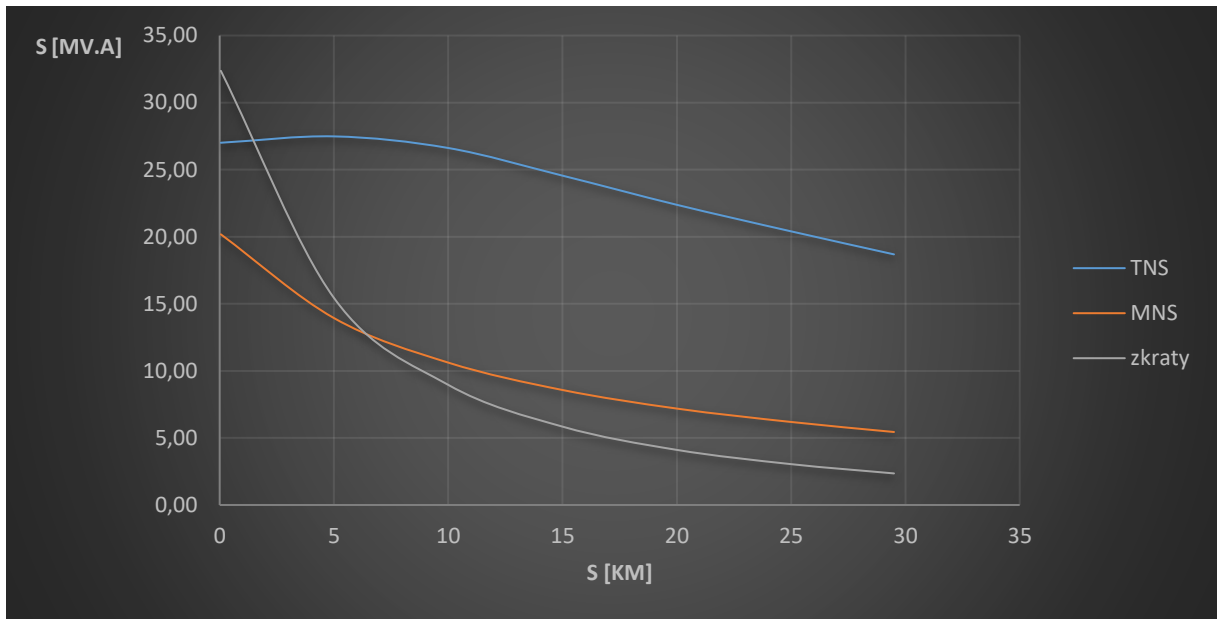
Obrázek 51 Závislost napětí na vzdálenosti zkratu

3)  $\cos\varphi=f(s)$



Obrázek 52 Závislost účinníku na vzdálenosti zkratu

4)  $S=f(s)$



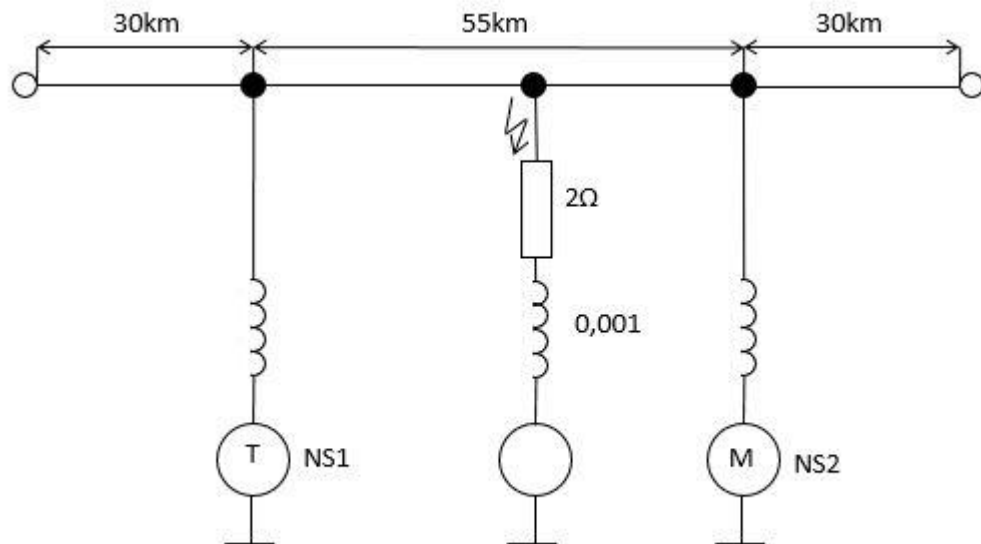
Obrázek 53 Závislost zdánlivého výkonu na vzdálenosti zkratu

Zkraty za stanicí konvenční koncepce								
ZTM	Konvenční napájecí stanice							
	s [km]	0,05	5	10	15	20	25	29,5
	$I_{NS2}$ [A]	3334,604	2302,637	1754,022	1416,462	1187,836	1022,746	899,038
	$\cos\varphi_{NS2}$ [-]	0,995621	0,714854	0,578567	0,515252	0,479477	0,456613	0,440908
	$U_{NS2}$ [kV]	8,099	11,935	15,175	17,334	18,842	19,947	20,784
	$S_{NS2}$ [MV.A]	27,01	27,48	26,62	24,55	22,38	20,40	18,69
	Měničová napájecí stanice							
	s [km]	0,05	5	10	15	20	25	29,5
	$I_{NS2}$ [A]	747,422	516,116	393,149	317,488	266,243	229,240	201,512
	$\cos\varphi_{NS2}$ [-]	0,677889	0,691144	0,698093	0,702336	0,705195	0,707252	0,708789
	$U_{NS2}$ [kV]	26,999	26,999	26,999	27,000	27,000	27,000	27,000
	$S_{NS2}$ [MV.A]	20,18	13,93	10,61	8,57	7,19	6,19	5,44
	Místo zkratu							
	s [km]	0,05	5	10	15	20	25	29,5
	$I_{zkrat}$ [A]	4023,061	2778,035	2116,155	1708,903	1433,075	1233,9	1084,652
	$U_{zkrat}$ [kV]	8,046	5,556	4,232	3,418	2,866	2,468	2,169
	$S_{zkrat}$ [MV.A]	32,370	15,435	8,956	5,841	4,107	3,045	2,353

Tabulka 42 Přehledová tabulka zjištěných parametrů zkratu

### Zkrat na úseku mezi stanicí klasické koncepce a měničovou napájecí stanicí:

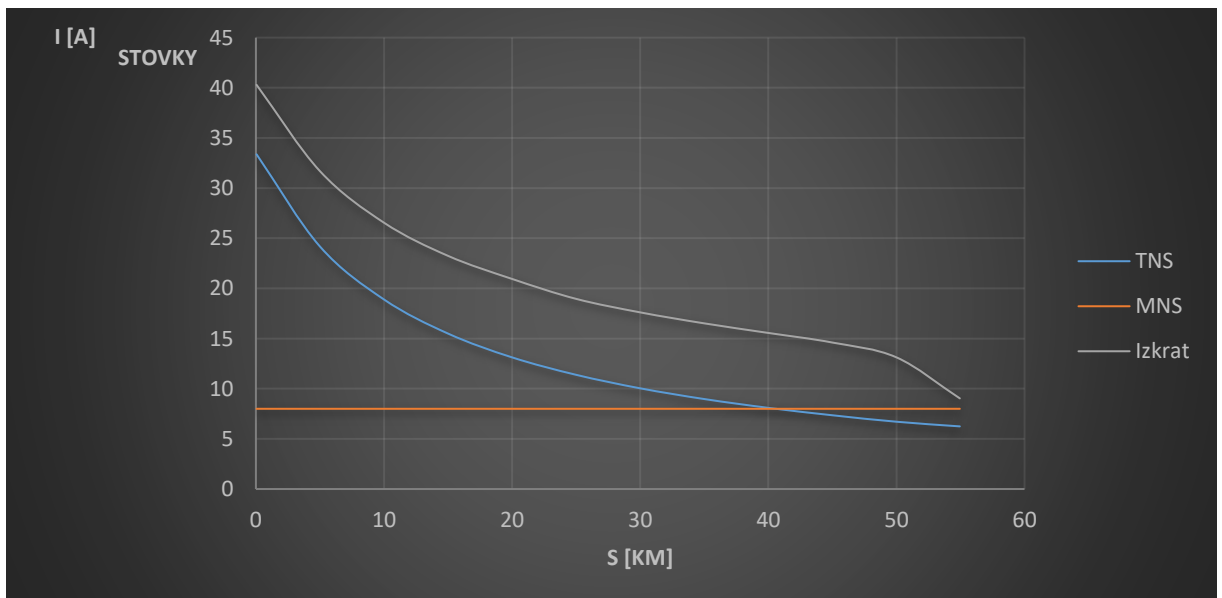
Pro upřesnění zadání si níže vložíme schéma znázorňující délku trati, kde budeme uvažovat zkrat po 5 km dlouhých skocích od stanice až na konec traťového úseku. Vzdálenost bude počítána od stanice klasické koncepce k měničové napájecí stanici.



Obrázek 54 Schéma soustavy pro modelování zkratu mezi stanicí klasické koncepce a měničovou napájecí stanicí

### Zjišťované závislosti:

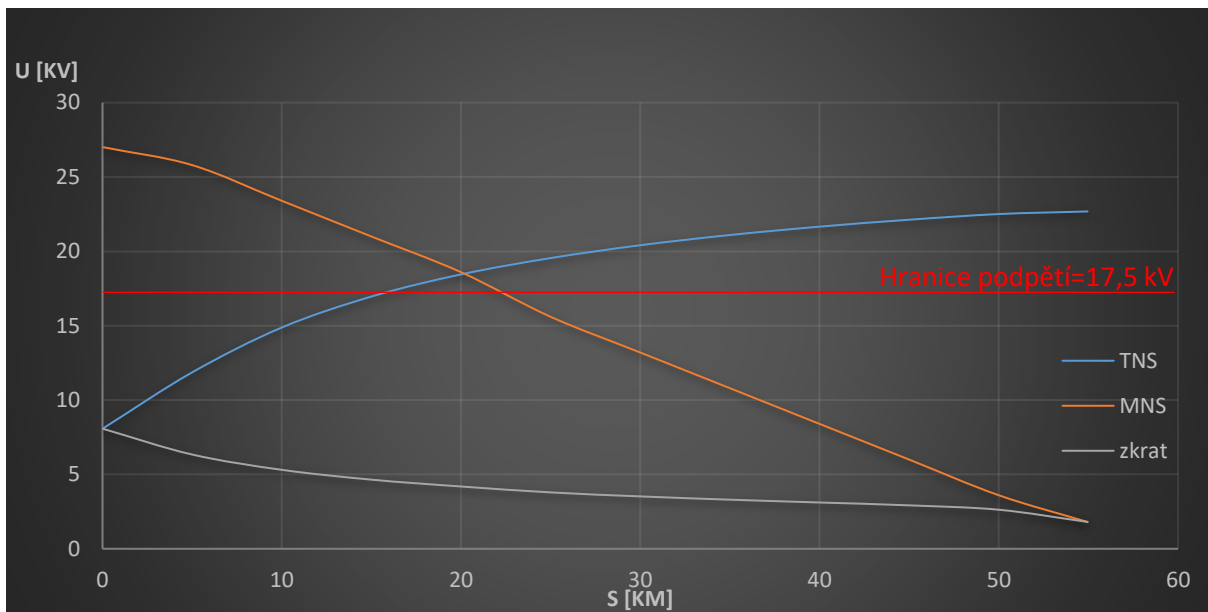
1)  $I=f(s)$



Obrázek 55 Závislost proudu na vzdálenosti zkratu

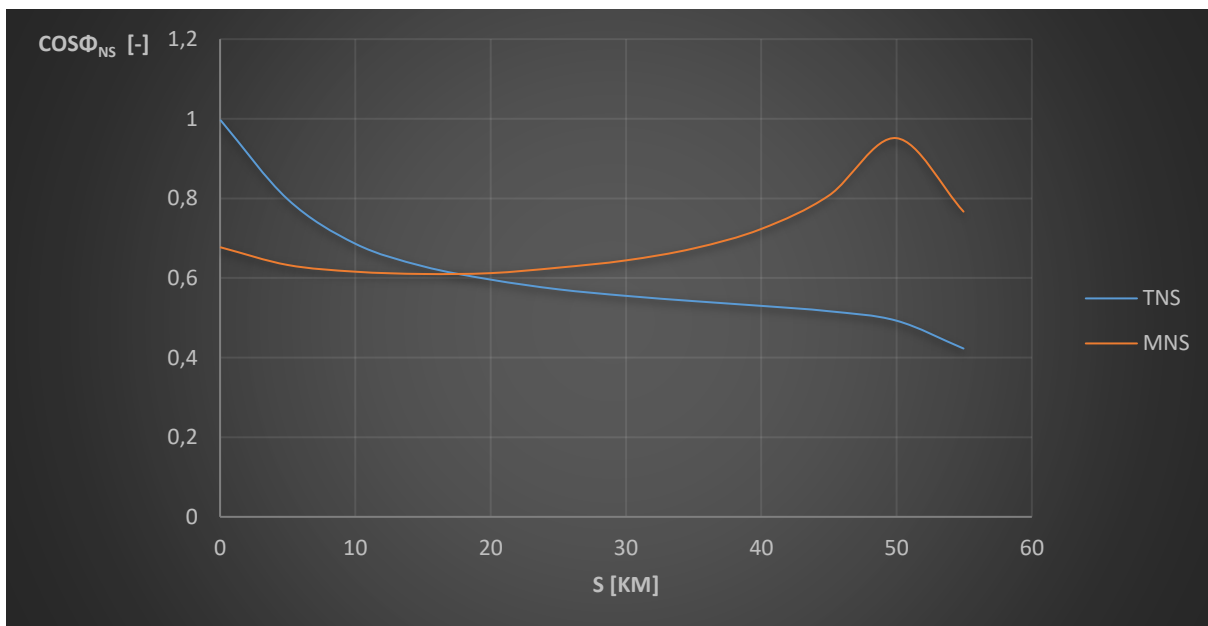


2)  $U=f(s)$



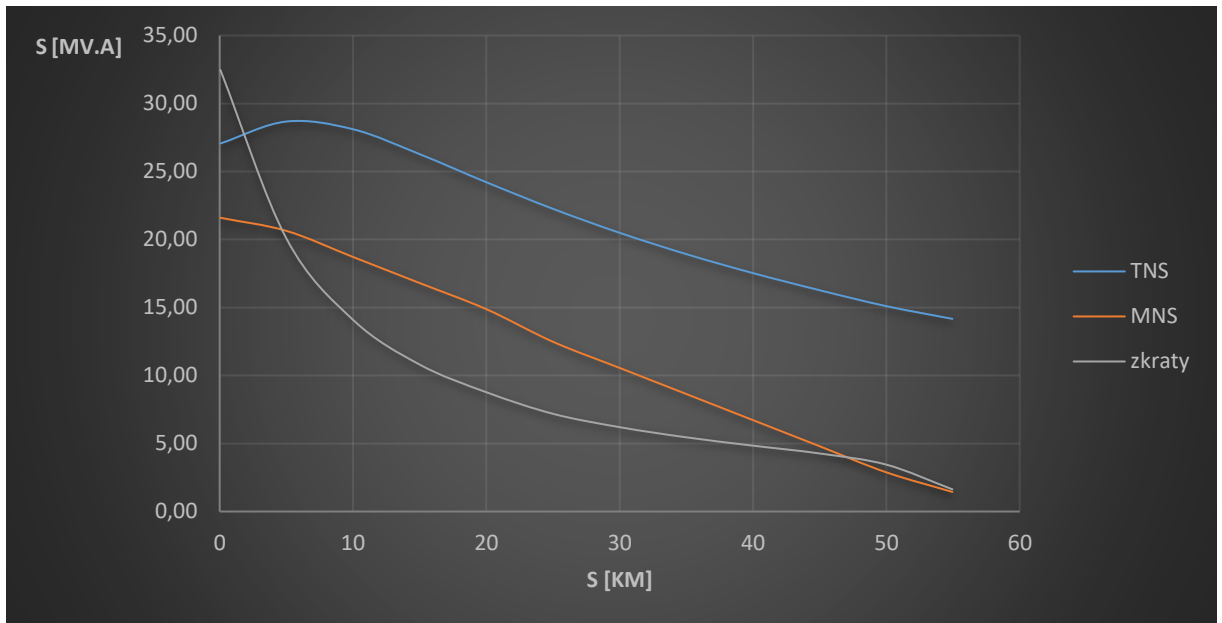
Obrázek 56 Závislost napětí na vzdálenosti zkratu

3)  $\cos\varphi=f(s)$



Obrázek 57 Závislost účinníku na vzdálenosti zkratu

4)  $S=f(s)$



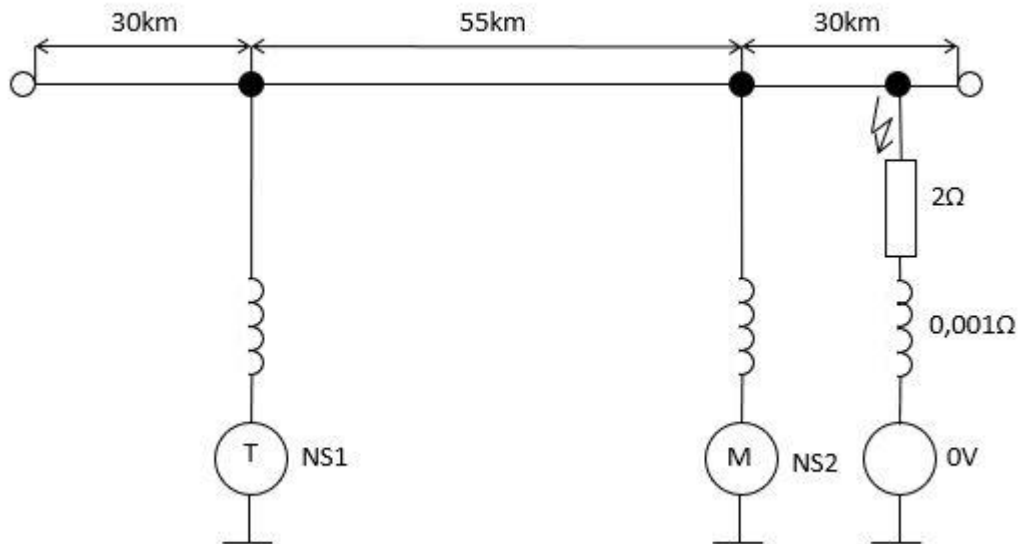
Obrázek 58 Závislost zdánlivého výkonu na vzdálenosti zkratu

Zkraty mezi stanicemi (směr od Konvenční stanice k Měničové napájecí stanici)													
T <sub>ZM</sub>	Konvenční napájecí stanice												
	s [km]	0,05	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	54,95
	$I_{NS1}$ [A]	3336,947	2417,687	1889,644	1549,595	1312,390	1138,643	1004,077	897,062	809,411	735,400	670,954	624,559
	$\cos\varphi_{NS1}$ [-]	0,995879	0,797608	0,686013	0,629482	0,595965	0,571582	0,555117	0,541934	0,529997	0,516515	0,492765	0,42282
	$U_{NS1}$ [kV]	8,110152	11,86157	14,876	16,959	18,451	19,547	20,410	21,098	21,659	22,126	22,507	22,682
	$S_{NS1}$ [MV.A]	27,06	28,68	28,11	26,28	24,21	22,26	20,49	18,93	17,53	16,27	15,10	14,17
	Měničová napájecí stanice												
	s [km]	0,05	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	54,95
	$I_{NS2}$ [A]	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800
	$\cos\varphi_{NS2}$ [-]	0,676989	0,632695	0,615834	0,610103	0,612261	0,626004	0,644285	0,674289	0,723269	0,807182	0,951354	0,766792
	$U_{NS2}$ [kV]	26,99894	25,7989	23,399	20,999	18,599	15,599	13,199	10,799	8,399	5,999	3,599	1,800
	$S_{NS2}$ [MV.A]	21,60	20,64	18,72	16,80	14,88	12,48	10,56	8,64	6,72	4,80	2,88	1,44
	Místo zkratu												
	s [km]	0,05	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	54,95
	$I_{zkrat}$ [A]	4029,55	3169,062	2654,919	2324,272	2094,347	1895,556	1761,079	1651,51	1556,188	1460,465	1312,701	903,4513
	$U_{zkrat}$ [kV]	8,059102	6,338124	5,309838	4,648544	4,188695	3,791112	3,522158	3,30302	3,112377	2,92093	2,625402	1,806903
	$S_{zkrat}$ [MV.A]	32,47456	20,08591	14,09719	10,80448	8,772581	7,186265	6,202798	5,454971	4,843445	4,265914	3,446366	1,632449

Tabulka 43 Přehledová tabulka zjištěných parametrů zkratu

### Zkrat na úseku za měničovou napájecí stanicí:

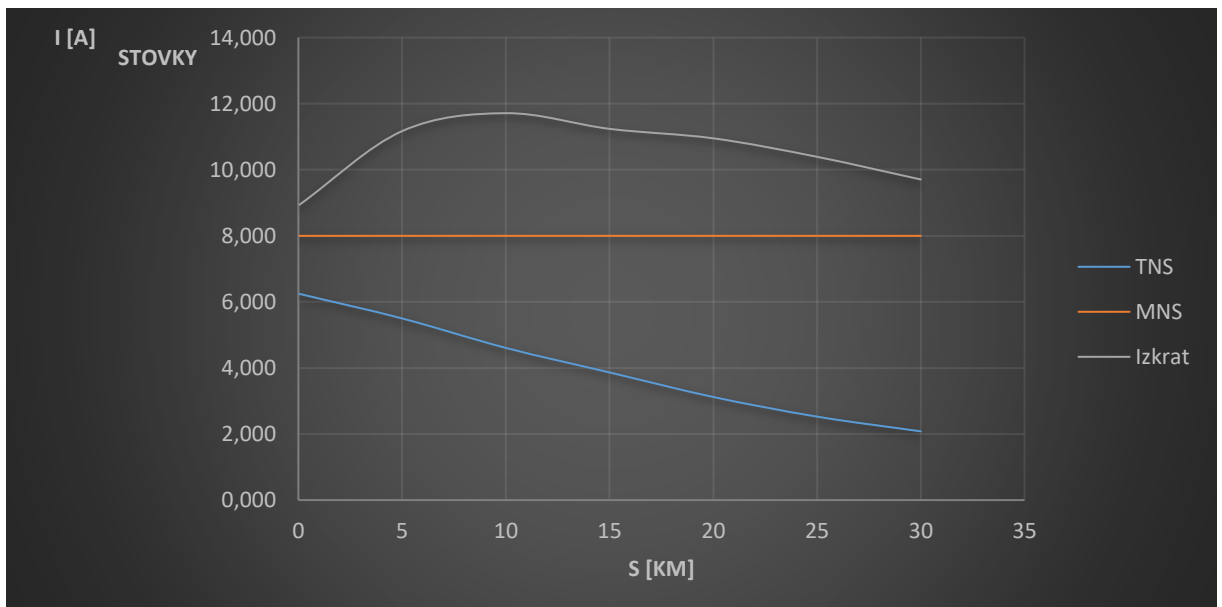
Pro upřesnění zadání si níže vložíme schéma znázorňující délku trati, kde budeme uvažovat zkrat po 5 km dlouhých skocích od stanice až na konec traťového úseku. Vzdálenost bude počítána od měničové napájecí stanice ke konci tratě.



Obrázek 59 Schéma soustavy pro modelování zkratu za měničovou napájecí stanicí

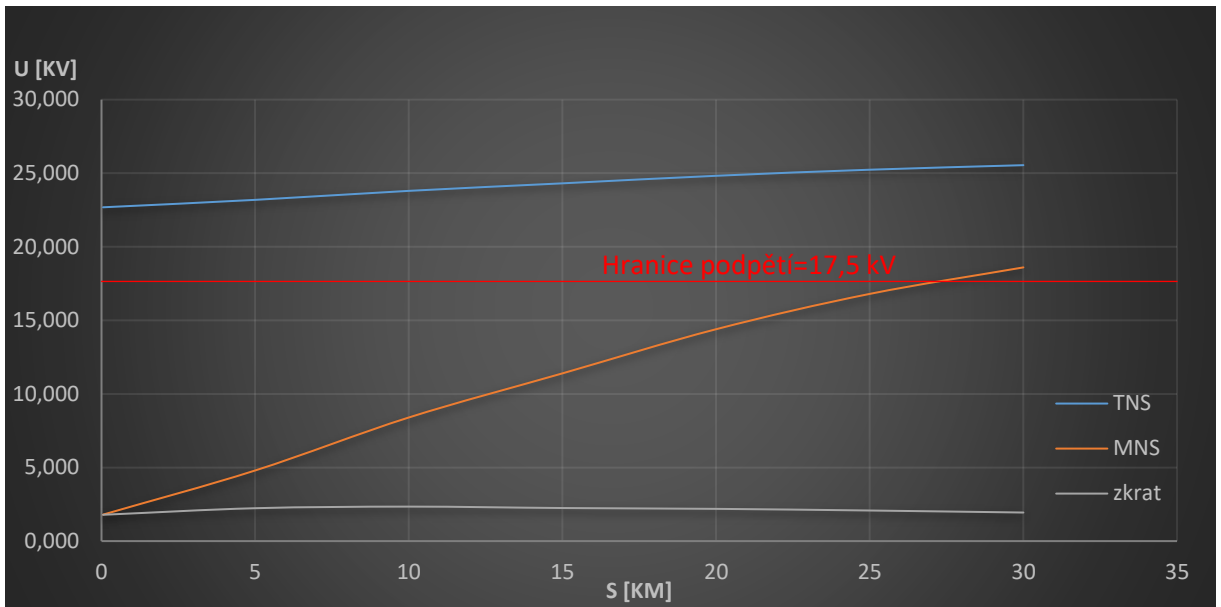
### Zjišťované závislosti:

1)  $I=f(s)$



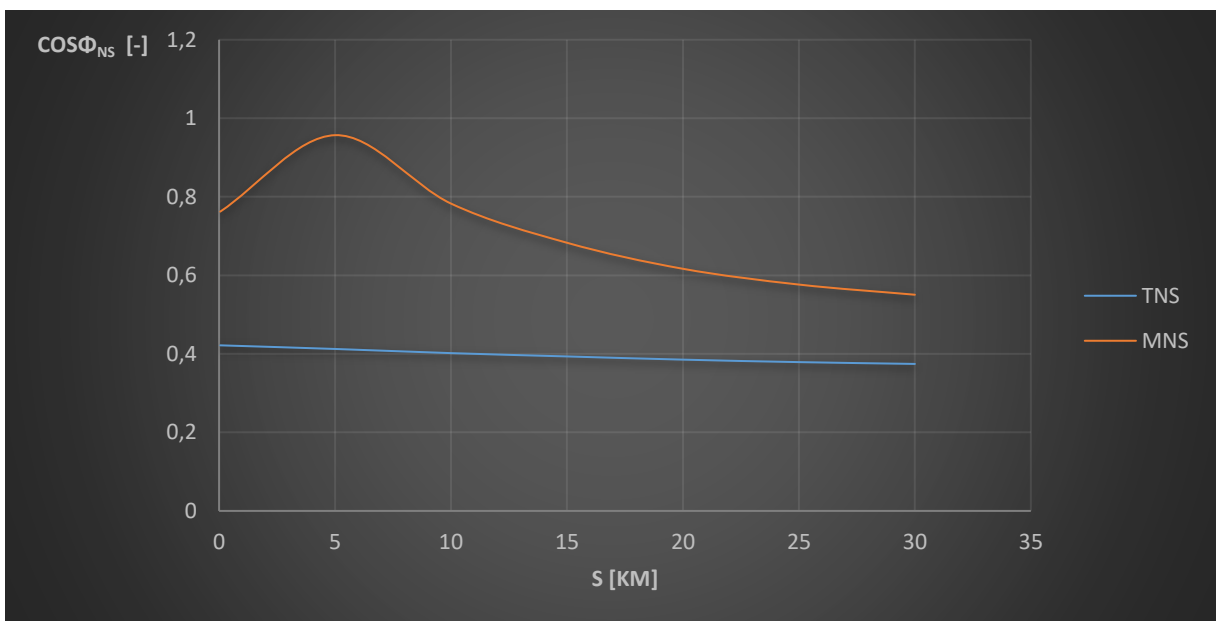
Obrázek 60 Závislost proudu na vzdálenosti zkratu

2)  $U=f(s)$



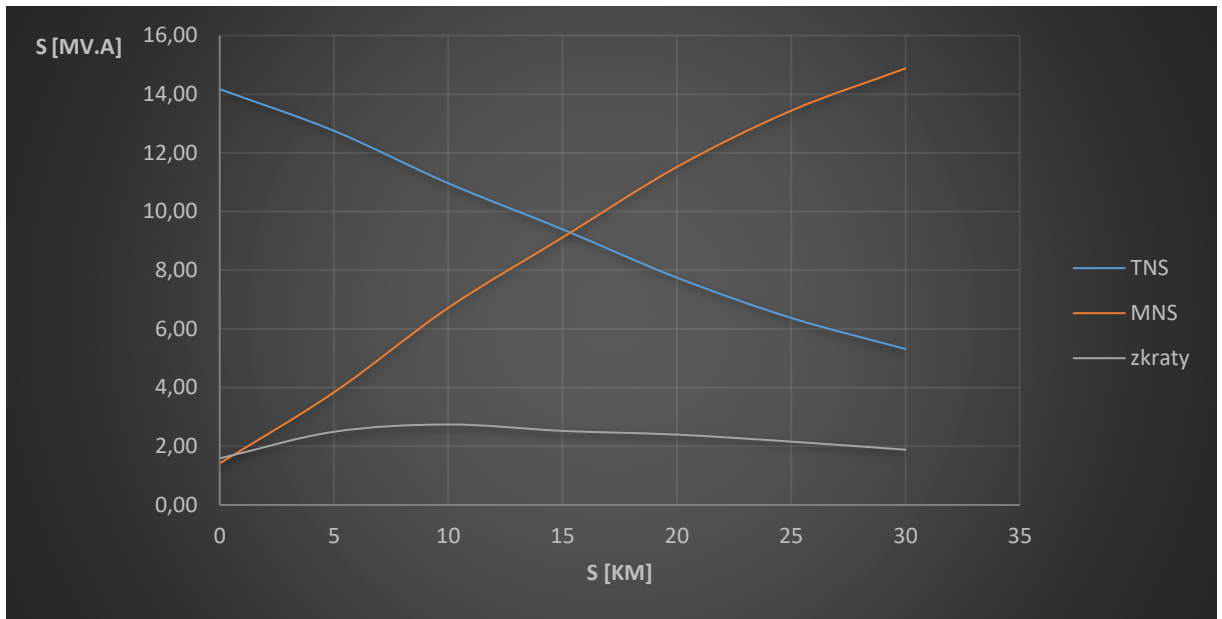
Obrázek 61 Závislost napětí na vzdálenosti zkratu

3)  $\cos\varphi=f(s)$



Obrázek 62 Závislost účinníku na vzdálenosti zkratu

4)  $S=f(s)$



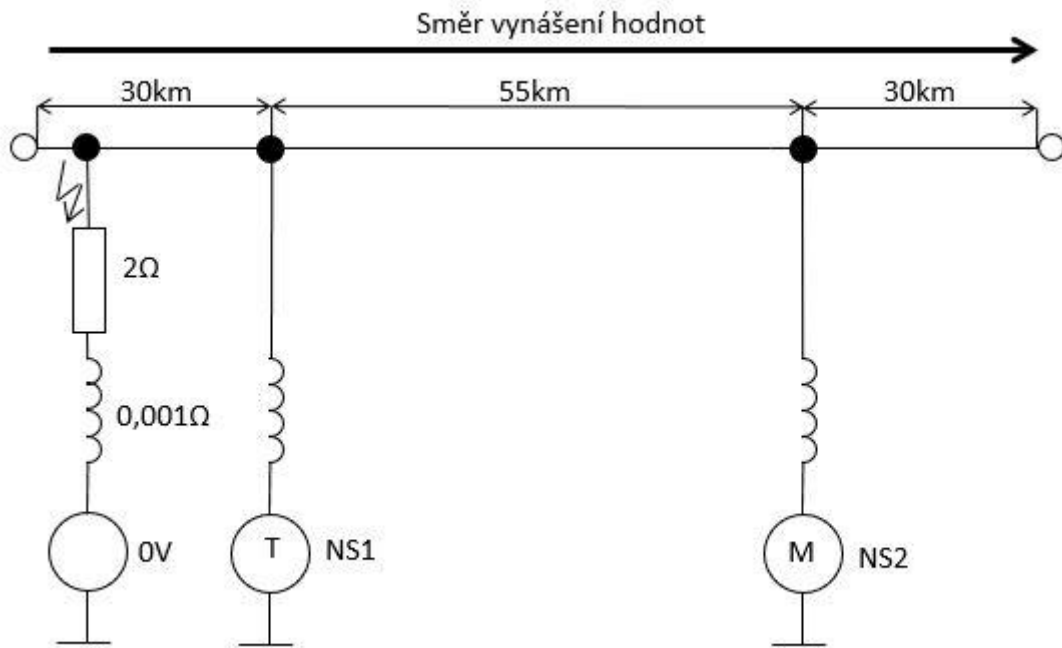
Obrázek 63 Závislost zdánlivého výkonu na vzdálenosti zkratu

Zkraty za Měničovou napájecí stanicí								
TMZ	Konvenční napájecí stanice							
	s [km]	0,05	5	10	15	20	25	30
	$I_{NS1}$ [A]	624,258	549,961	460,786	386,471	312,155	252,702	208,112
	$\cos\varphi_{NS1}$ [-]	0,421729	0,412491	0,401892	0,393432	0,385289	0,378993	0,374391
	$U_{NS1}$ [kV]	22,682	23,189	23,800	24,311	24,824	25,236	25,546
	$S_{NS1}$ [MV.A]	14,16	12,75	10,97	9,40	7,75	6,38	5,32
	Měničová napájecí stanice							
	s [km]	0,05	5	10	15	20	25	30
	$I_{NS2}$ [A]	800	800	800	800	800	800	800
	$\cos\varphi_{NS2}$ [-]	0,762256	0,957003	0,782724	0,682939	0,616674	0,57646	0,550606
	$U_{NS2}$ [kV]	1,800	4,799	8,399	11,399	14,399	16,799	18,599
	$S_{NS2}$ [MV.A]	1,44	3,84	6,72	9,12	11,52	13,44	14,88
	Místo zkratu							
	s [km]	0,05	5	10	15	20	25	30
	$I_{zkrat}$ [A]	894,0476	1117,045	1171,263	1123,776	1095,164	1039,149	970,643
	$U_{zkrat}$ [kV]	1,788095	2,234091	2,342526	2,247552	2,190328	2,078298	1,941286
	$S_{zkrat}$ [MV.A]	1,598642	2,49558	2,743715	2,525744	2,398768	2,159661	1,884296

Tabulka 44 Přehledová tabulka zjištěných parametrů zkratu

## Spojené výsledky zkratů z celé trati:

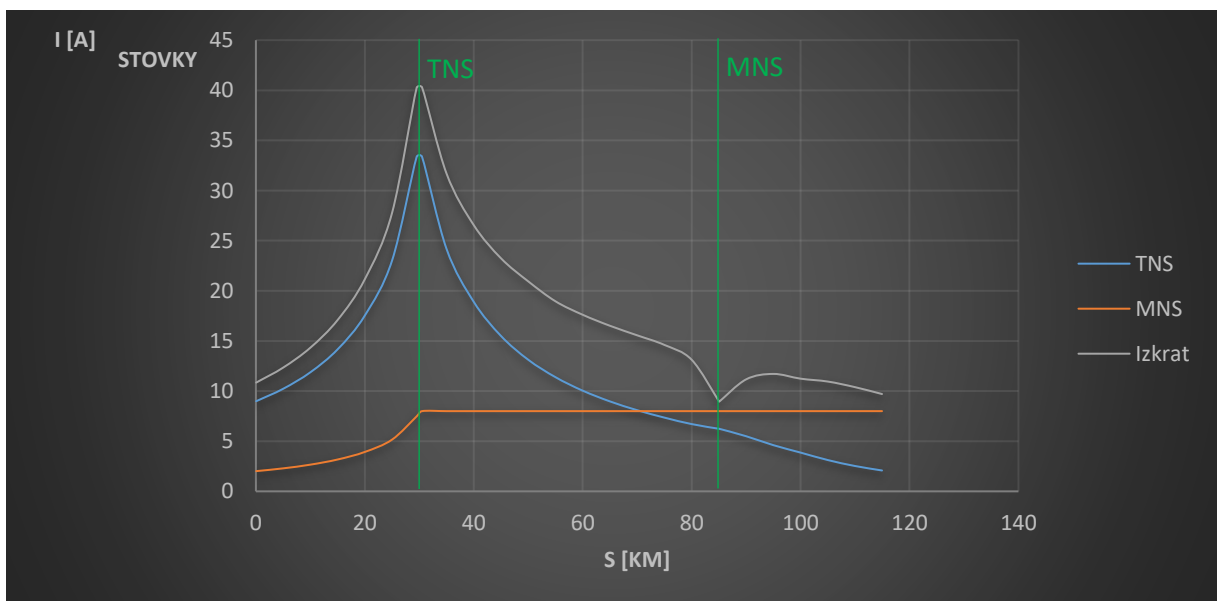
Pro upřesnění je třeba říci, jak jsme postupovali při spojování výsledků zkratů a jejich vykreslování do grafů. Postupovali jsme od začátku trati, která je před napájecí stanicí po 5km skocích až po konec trati, která se nachází za měničovou napájecí stanicí. Pro názornost je níže vloženo schéma, ve kterém je tučně zakreslen směr vynášení hodnot a do grafů jsou přidány svislé zelené čáry, které určují polohu napájecích stanic na trati.



Obrázek 64 Schéma udávající směr vynášených hodnot zkratu

## Zjišťované závislosti:

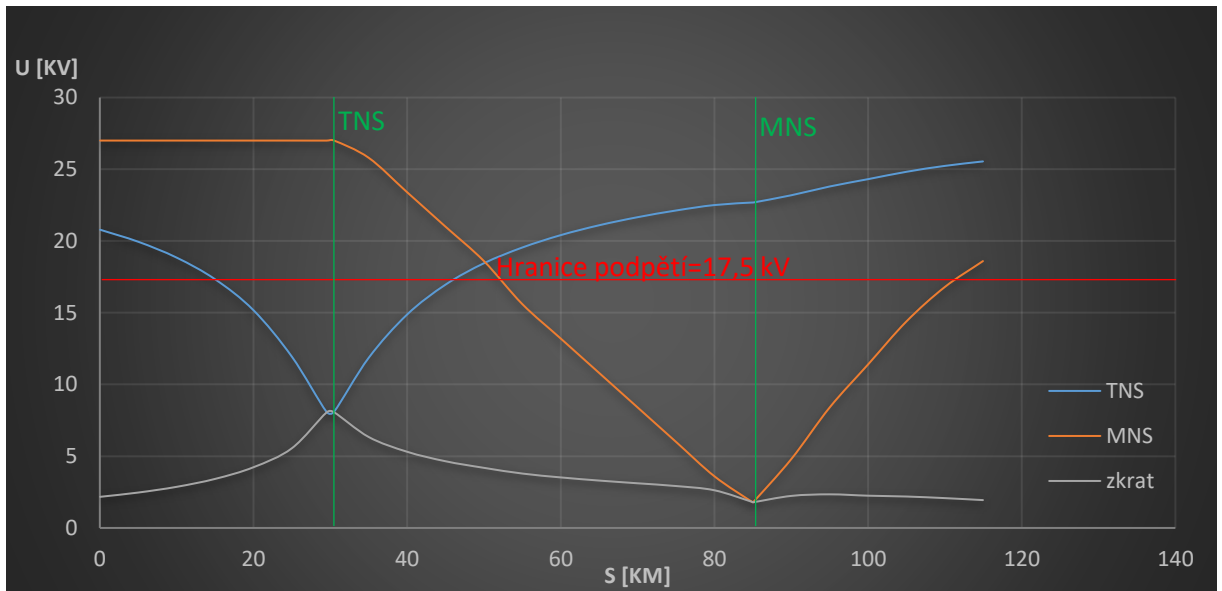
1)  $I=f(s)$



Obrázek 65 Závislost proudu na vzdálenosti zkratu

Z průběhů grafu na obrázku 65 je poměrně dobře vidět rozdíl v charakteru obou napájecích stanic, kde napájecí stanice klasické koncepce se chová při zkratu v její blízkosti jako napěťový zdroj s vnitřní impedancí, zatímco měničová jako tvrdý zdroj proudu a omezí, tak proud při zkratu v její blízkosti.

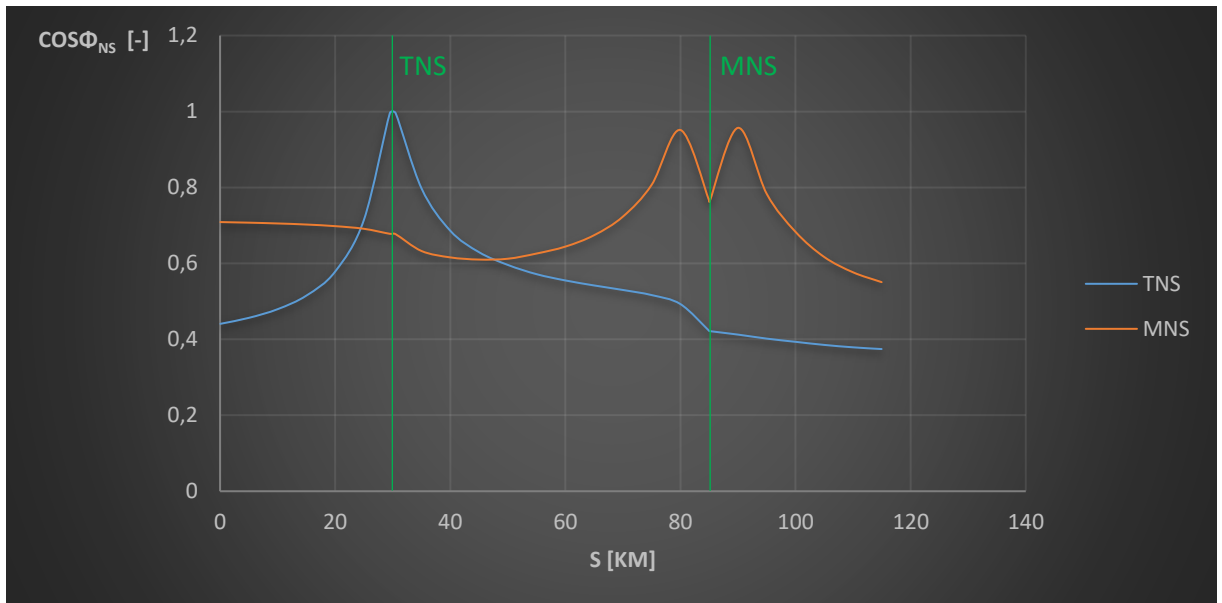
$$2) U=f(s)$$



Obrázek 66 Závislost napětí na vzdálenosti zkratu

Z průběhů grafu na obrázku 66 je dobře patrné, jak při zkratu na trati napájené při podobném uspořádání napájecích stanic se dá dobře rozpoznat, v kterém úseku ke zkratu došlo, protože při zkratu před napájecí stanicí klasické koncepce prakticky nepoklesne napětí napájecí stanice měničové. V případě zkratu za měničovou napájecí poklesne sice napětí napájecí stanice klasické koncepce, ale pořád se drží v jistých přijatelných mezích podpětí, zatímco napětí měničové stanice prudce klesne pod hranici přijatelného napětí. V případě zkratu mezi napájecími stanicemi je velmi důležité dobře zvolit vzdálenost mezi napájecími stanicemi, abychom dobře rozpoznali zkrat v tomto úseku a nevyhodnotili napětí stanice jako napětí v přijatelných mezích jedné či druhé stanice, což by nás mohlo vést k tomu, že zkrat je v jiném úseku. Důležité tedy při návrhu rozmístění napájecích stanic je to, aby napájecí stanice byly rozmístěny tak, aby zkrat nebylo možné označit za běžné podpětí.

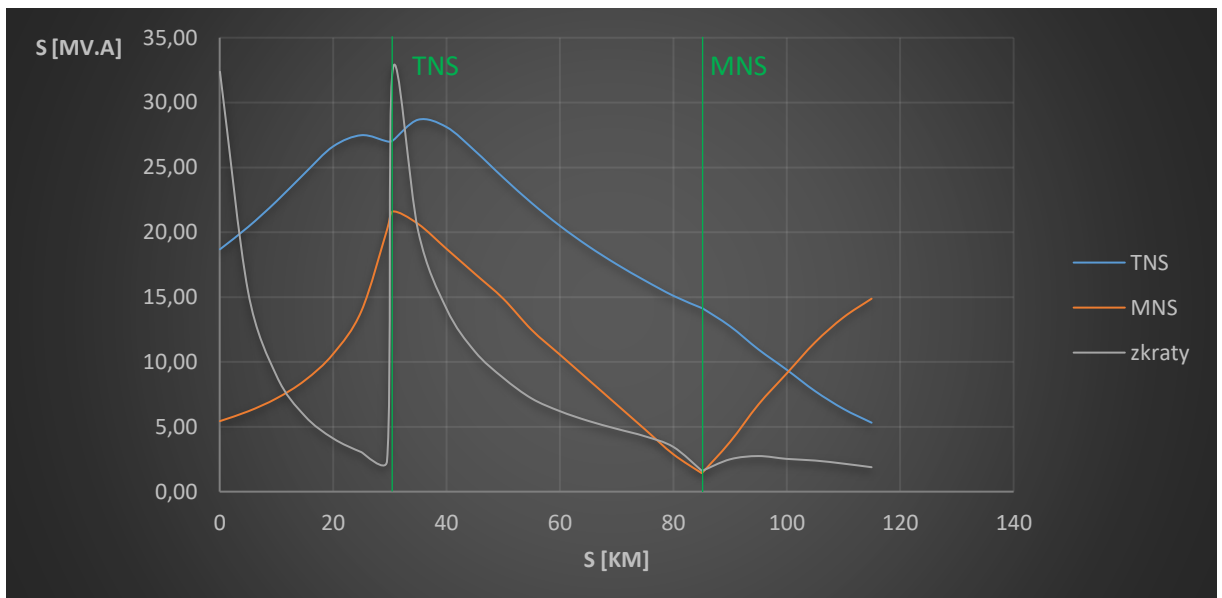
### 3) $\cos\varphi=f(s)$



Obrázek 67 Závislost účinníku na vzdálenosti zkratu

Z průběhů grafu na obrázku **67** stojí za povšimnutí průběh účinníku měničové napájecí stanice, kde vidíme oproti napájecí stanici klasické koncepce, tak trochu netradiční tvar v tom, že mezi zkratem hned za napájecí měničovou stanicí a prvními 5km trati směrem od stanice dojde ke zlepšení účinníku, což je dáno charakterem napájecí stanice a příspěvkem konvenční napájecí stanice. Dále stojí za zmínění zajímavost, že oproti případu, kdy jsme uvažovali jednostranné napájení zde neklesá účinník měničové napájecí stanice stejně prudce jako v případě stanice klasické koncepce.

### 4) $S=f(s)$



Obrázek 68 Závislost zdánlivého výkonu na vzdálenosti zkratu

Z průběhů grafu na obrázku **68** stojí za povšimnutí, jak výrazně dokáže měničová napájecí stanice snížit hodnotu zkratového výkonu ve své blízkosti oproti stanici klasické koncepce.



## Závěr

Při návrhu rozmístění trakčních napájecích stanic klasické koncepce jsme postupovali tak, že jsme na základě jízdního řádu, přehledové tabulky provozovaných vlaků a základních všeobecně platných vzorců na straně 9, napočítali minimální očekávatelnou energetickou a výkonovou zatíženost nově elektrifikovaných tratí. Další skutečností, jež jsme při rozmístování stanic brali v potaz, je existence distribuční soustavy 110 kV poblíž tratě. To nás dovedlo k rozmístění napájecích stanic, které je zobrazeno na obrázku 9.

Po porovnání obou systémů napájení tratí jsme došli k závěru, že užitím měničové napájecí stanice docílíme za pomoci tvrdšího napětí a spojitého napájení větší úspory energie než při použití čistě konvenčních napájecích stanic, což samo o sobě vede ke zvážení nasazení těchto stanic ve větší míře i bez uvážení zaručené výhody v podobě souměrného odběru z distribuční sítě 110 kV.

Při porovnávání zkratových poměrů u stanice klasické koncepce s měničovou napájecí stanicí dojdeme k závěru, že měničová napájecí stanice chovající se jako proudový zdroj, zásadním způsobem omezí zkratový výkon a proud díky proudové regulaci, což je z pohledu životnosti dalších zařízení velice pozitivní. Dále stojí za zmínku, že z analýzy zkratu vyplývá skutečnost, že měničová napájecí stanice může napájet větší traťový úsek než napájecí stanice klasické koncepce, aniž bychom se museli bát, že vzdálený zkrat bude maskován jako podpětí, které je ještě povolené v běžném chodu trakční sítě viz obrázky 47 a 66.

Vzhled k možnostem daným distribuční soustavou bych navrhoval další umístění měničové napájecí stanice v Nymburce, vzhledem ke skutečnosti, že trať z Nymburka do Mladé Boleslavi je nejvíce zatížená trať z tratí zde uvažovaných. V rámci tohoto projektu byla uvažována v Nymburce napájecí stanice klasické koncepce, a i ta měla značný vliv na zlepšení tvrdosti napětí.

## Použitá literatura

- [1] ŽIŽLAVSKÝ, Petr. Analýza trakčních odběrů měničových napájecích stanic 25 kV 50 Hz. Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera, 2021. Diplomová práce. Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera. Vedoucí práce Prof. Ing. Jaroslav Novák, CSc.
- [2] KULICH, Lukáš. Koncepční návrh rozmístění trakčních napájecích stanic 25 kV, 50 Hz. 2021. Ročníkový projekt 2. Vedoucí práce Prof. Ing. Jaroslav Novák, CSc.
- [3] KULICH, Lukáš. *ENERGETICKÁ OPTIMALIZACE JÍZDY KOLEJOVÉHO VOZIDLA*. 2018. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. Vedoucí práce Prof. Ing. Jaroslav Novák, CSc.
- [4] DOLEČEK, Radovan a Ondřej ČERNÝ. *Trakční napájecí soustavy: studijní opora*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2015. ISBN ISBN978-80-7395-879-4.
- [5] DOLEČEK, PH.D., doc. Ing. Radovan. *NAPÁJENÍ ELEKTRICKÝCH DRAH*. 2012.
- [6] [online]. [cit. 2021-6-24]. Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?x=14.4479000&y=50.0761000&z=11>
- [7] [online]. [cit. 2021-6-24]. Dostupné z: <http://www.railian.com/teorie/jizdniodpory.html>
- [8] [online]. [cit. 2021-6-24]. Dostupné z: <https://idos.idnes.cz/vlakyautobusymhdvse/spojeni/>

## Seznam obrázků

Obrázek 1 Elektrifikace tratí v České republice. [5] .....	2
Obrázek 2 Blokové schéma soustavy 3 kV DC. [5] .....	2
Obrázek 3 Blokové schéma soustavy 25 kV, 50 Hz AC [5].....	3
Obrázek 4 Zapojení transformátorů do "V"[5] .....	6
Obrázek 5 Zapojení transformátorů do „T“ [5] .....	6
Obrázek 6 Výběr traťových úseků pro budoucí elektrifikaci .....	7
Obrázek 7 Plán jízdy vlaku Os 6050 na lince S31 [8] .....	10
Obrázek 8 Plán jízdy vlaku R6 1194 na lince R22 [8] .....	11
Obrázek 9 Schéma rozmístění napájecích stanic .....	15
Obrázek 10 Blokové schéma měničové napájecí stanice [1].....	16
Obrázek 11 Schéma udávající topologii trati pro výpočetní model [1] .....	17
Obrázek 12 Náhradní schéma dvou vlaků v jednom úseku [1] .....	18
Obrázek 13 Schéma rozmístění napájecích stanic při spojitém napájení (koncepte s využitím měničové napájecí stanice) [1] .....	21
Obrázek 14 Schéma rozmístění napájecích stanic při nespojitém napájení (klasická koncepte) .....	22
Obrázek 15 Zatížení napájecích stanic v raním scénáři při T=10s (koncepte s využitím měničové napájecí stanice) [1] .....	23
Obrázek 16 Zatížení napájecích stanic v raním scénáři při T=10s (klasická koncepte) .....	23
Obrázek 17 Zatížení napájecích stanic v raním scénáři při T=1s (koncepte s využitím měničové napájecí stanice) .....	24
Obrázek 18 Zatížení napájecích stanic v raním scénáři při T=1s (klasická koncepte) .....	24
Obrázek 19 Spotřeba energií v ranním scénáři (koncepte s využitím měničové napájecí stanice) [1] .....	25
Obrázek 20 Spotřeba energií v ranním scénáři (klasická koncepte) .....	25
Obrázek 21 Graf průběhu účinnosti v ranním scénáři (koncepte s využitím měničové napájecí stanice) [1] .....	26
Obrázek 22 Graf průběhu účinností v ranním scénáři (klasická koncepte) [1].....	27
Obrázek 23 Průběh napětí na sběrači vlaku 20 v ranním scénáři (koncepte s využitím měničové napájecí stanice) [1] .....	28
Obrázek 24 Průběh napětí na sběrači vlaku 20 v ranním scénáři (klasická koncepte) .....	28
Obrázek 25 Průběh napětí na sběrači vlaku 10 v ranním scénáři (koncepte s využitím měničové napájecí stanice) [1] .....	29
Obrázek 26 Průběh napětí na sběrači vlaku 10 v ranním scénáři (klasická koncepte) .....	30

Obrázek 27 Průběh napětí na sběrači vlaku 11 v ranním scénáři (koncepte s využitím měničové napájecí stanice) [1] .....	31
Obrázek 28 Průběh napětí na sběrači vlaku 11 v ranním scénáři (klasická koncepte) .....	31
Obrázek 29 Zatížení napájecích stanic v odpoledním scénáři (koncepte s využitím měničové napájecí stanice) [1] .....	32
Obrázek 30 Zatížení napájecích stanic v odpoledním scénáři (klasická koncepte) .....	32
Obrázek 31 Spotřeba energií v odpoledním scénáři (koncepte s využitím měničové napájecí stanice) .....	33
Obrázek 32 Spotřeba energií v odpoledním scénáři (klasická koncepte) .....	33
Obrázek 33 Graf průběhu účinnosti v odpoledním scénáři (koncepte s využitím měničové napájecí stanice) [1] .....	34
Obrázek 34 Graf průběhu účinností v odpoledním scénáři (klasická koncepte) .....	35
Obrázek 35 Tabulka znázorňující rozdíl celkové E účinnosti v odpoledním scénáři .....	35
Obrázek 36 Průběh napětí na sběrači vlaku 3 v odpoledním scénáři (koncepte s využitím měničové napájecí stanice) [1] .....	36
Obrázek 37 Průběh napětí na sběrači vlaku 3 v odpoledním scénáři (klasická koncepte) .....	36
Obrázek 38 Průběh napětí na sběrači vlaku 24 v odpoledním scénáři (koncepte s využitím měničové napájecí stanice) [1] .....	37
Obrázek 39 Průběh napětí na sběrači vlaku 24 v odpoledním scénáři (klasická koncepte) ....	37
Obrázek 40 Průběh napětí na sběrači vlaku 37 v odpoledním scénáři (koncepte s využitím měničové napájecí stanice) [1] .....	38
Obrázek 41 Průběh napětí na sběrači vlaku 37 v odpoledním scénáři (klasická koncepte) .....	39
Obrázek 42 Porovnání celkového odebíraného výkonu u obou scénářů (koncepte s využitím měničové napájecí stanice) [1] .....	40
Obrázek 43 Porovnání celkového odebíraného výkonu u obou scénářů (klasická koncepte) .	40
Obrázek 44 Schéma soustavy pro modelování zkratu na jednostranně napájeném úseku .....	41
Obrázek 45 Závislost proudu napájecí stanice na vzdálenosti zkratu .....	42
Obrázek 46 Závislost účinníku napájecí stanice na vzdálenosti zkratu .....	43
Obrázek 47 Závislost napětí napájecí stanice na vzdálenosti zkratu .....	44
Obrázek 48 Závislost zdánlivého výkonu napájecí stanice na vzdálenosti zkratu .....	45
Obrázek 49 Schéma soustavy pro modelování zkratu před stanicí klasické koncepte .....	46
Obrázek 50 Závislost proudu na vzdálenosti zkratu .....	46
Obrázek 51 Závislost napětí na vzdálenosti zkratu .....	47
Obrázek 52 Závislost účinníku na vzdálenosti zkratu .....	47
Obrázek 53 Závislost zdánlivého výkonu na vzdálenosti zkratu .....	48

Obrázek 54 Schéma soustavy pro modelování zkratu mezi stanicí klasické koncepce a měničovou napájecí stanicí .....	49
Obrázek 55 Závislost proudu na vzdálenosti zkratu .....	49
Obrázek 56 Závislost napětí na vzdálenosti zkratu .....	50
Obrázek 57 Závislost účinníku na vzdálenosti zkratu .....	50
Obrázek 58 Závislost zdánlivého výkonu na vzdálenosti zkratu.....	51
Obrázek 59 Schéma soustavy pro modelování zkratu za měničovou napájecí stanicí .....	52
Obrázek 60 Závislost proudu na vzdálenosti zkratu .....	52
Obrázek 61 Závislost napětí na vzdálenosti zkratu .....	53
Obrázek 62 Závislost účinníku na vzdálenosti zkratu .....	53
Obrázek 63 Závislost zdánlivého výkonu na vzdálenosti zkratu.....	54
Obrázek 64 Schéma udávající směr vynášených hodnot zkratu.....	55
Obrázek 65 Závislost proudu na vzdálenosti zkratu .....	55
Obrázek 66 Závislost napětí na vzdálenosti zkratu .....	56
Obrázek 67 Závislost účinníku na vzdálenosti zkratu .....	57
Obrázek 68 Závislost zdánlivého výkonu na vzdálenosti zkratu.....	57

## Seznam tabulek

Tabulka 1 Přehledová tabulka provozovaných vlaků .....	8
Tabulka 2 Tabulka jízdnic odporů [7] .....	8
Tabulka 3 Přehledová tabulka provozovaných vlaků Nymburk-Mladá Boleslav .....	10
Tabulka 4 Energetická/výkonová náročnost cesty osobního vlaku [2] .....	10
Tabulka 5 Energetická/výkonová náročnost cesty expresního vlaku [2] .....	11
Tabulka 6 Energetická/výkonová náročnost cesty nákladního vlaku [2] .....	11
Tabulka 7 Energetická/výkonová náročnost cesty expresního nákladního vlaku [2].....	12
Tabulka 8 Energetická náročnost vlaků osobní dopavy Nymburk – Mladá Boleslav [2].....	12
Tabulka 9 Energetická náročnost vlaků nákladní dopavy Nymburk – Mladá Boleslav [2]....	12
Tabulka 10 Výkonová náročnost vlaků na trati mezi 15:00 a 17:00 [2].....	12
Tabulka 11 Přehledová tabulka provozovaných vlaků Mladá Boleslav-Bakov nad Jizerou....	13
Tabulka 12 Přehledová tabulka provozovaných vlaků Bakov nad Jizerou-Česká Lípa.....	13
Tabulka 13 Přehledová tabulka provozovaných vlaků Česká Lípa-Jablunné v Podještědí.....	13
Tabulka 14 Přehledová tabulka provozovaných vlaků Česká Lípa-Benešov nad Ploučnicí....	13
Tabulka 15 Přehledová tabulka provozovaných vlaků Benešov nad Ploučnicí-Děčín Východ .....	13
Tabulka 16 Přehledová tabulka předpokládaných energetických náročností vlaků osobní dopavy [2].....	14
Tabulka 17 Přehledová tabulka předpokládaných energetických náročností vlaků nákladní dopavy [2].....	14
Tabulka 18 Přehledová tabulka předpokládaných výkonových náročností vlaků na vybraných tratích mezi 15:00 a 17:00 [2].....	14
Tabulka 19 Zadání struktury trati .....	18
Tabulka 20 Definování napájecích stanic .....	19
Tabulka 21 Trasa vlaku 13 v čase 7:00 až 9:00 .....	19
Tabulka 22 Sloupce pro zadání aktuálních dat vlaku .....	19
Tabulka 23 Příklad vybraných sloupců výsledkové tabulky [1].....	20
Tabulka 24 Tabulka porovnávající maximální hodnoty zatížení napájecích stanic v České Lípě v ranním scénáři .....	25
Tabulka 25 Tabulka porovnávající celkové dodané energie v obou analýzách v ranním scénáři .....	26
Tabulka 26 Tabulka znázorňující rozdíl celkové E účinnosti v ranním scénáři.....	27
Tabulka 27 Tabulka znázorňující rozdíl poklesu napětí na sběrači vlaku 20 pro ranní scénář	29
Tabulka 28 Tabulka znázorňující rozdíl poklesu napětí na sběrači vlaku 10 pro ranní scénář	30

Tabulka 29 Tabulka znázorňující rozdíl poklesu napětí na sběrači vlaku 11 pro ranní scénář	32
Tabulka 30 Tabulka porovnávající maximální hodnoty zatížení napájecích stanic v České Lípě v odpoledním scénáři	33
Tabulka 31 Tabulka porovnávající celkové dodané energie v obou analýzách v odpoledním scénáři	34
Tabulka 32 Tabulka znázorňující rozdíl poklesu napětí na sběrači vlaku 3 pro odpolední scénář	37
Tabulka 33 Tabulka znázorňující rozdíl poklesu napětí na sběrači vlaku 24 pro odpolední scénář	38
Tabulka 34 Tabulka znázorňující rozdíl poklesu napětí na sběrači vlaku 37 pro odpolední scénář	39
Tabulka 35 Tabulka udávající maximální odebírané výkony ranních a odpoledních modelů	40
Tabulka 36 Zadání napájecích stanic	41
Tabulka 37 Tabulka zjištěných hodnot závislosti proudu napájecí stanice na vzdálenosti zkratu	42
Tabulka 38 Tabulka zjištěných hodnot závislosti účinníku napájecí stanice na vzdálenosti zkratu	43
Tabulka 39 Tabulka zjištěných hodnot závislosti napětí napájecí stanice na vzdálenosti zkratu	44
Tabulka 40 Tabulka zjištěných hodnot závislosti zdánlivého výkonu napájecí stanice na vzdálenosti zkratu	45
Tabulka 41 Přehledová tabulka zjištěných parametrů zkratu pro napájecí stanici klasické/měničové	45
Tabulka 42 Přehledová tabulka zjištěných parametrů zkratu	48
Tabulka 43 Přehledová tabulka zjištěných parametrů zkratu	51
Tabulka 44 Přehledová tabulka zjištěných parametrů zkratu	54

## Seznam příloh (přílohy jsou na přiloženém CD)

Příloha A – Jízdní řád ve formátu .xlsx [1]

Příloha B – Složka se zadávacími formuláři ve formátu. xlsx

Příloha C – Složka s výsledkovými tabulkami. xlsx