

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Analýza trakčních odběrů měničových napájecích stanic 25 kV 50 Hz
Bc. Petr Žižlavský

Diplomová práce
2021

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr Žížlavský**
Osobní číslo: **D19312**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Elektrotechnické a elektronické systémy v dopravě**
Téma práce: **Analýza trakčních odběrů měničových napájecích stanic 25 kV 50 Hz**
Zadávatel katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

Zásady pro vypracování

- a) Navrhněte kritéria pro optimální řízení měničových napájecích stanic a stanovte metody jejich řízení
- b) Analyzujte jízdní trajektorie vlakových souprav a připravte tato data ve formě souborů zachycujících výšece provozu na zadané struktuře železničních tratí
- c) Proveďte simulační výpočty zadaných jízd vlaků s vyčíslením zatížení napájecích stanic bez synchronizovaného řízení a se synchronizovaným řízením.
- d) Zhodnoťte průběhy zatížení napájecích stanic a vliv jejich řízení na rovnoměrnost zatížení v energetické síti, na minimalizaci rekuperace do energetické sítě a na účinnost přenosu trakčního výkonu

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 drážních 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**

Prohlášení autora

Prohlašuji:

Práci s názvem Analýza trakčních odběrů měničových napájecích stanic 25 kV 50 Hz 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., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, 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. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 12. 7. 2021

Petr Žižlavský

Poděkování

Na prvním místě bych chtěl poděkovat svojí rodině, za vytrvalou podporu v průběhu celého studia. Dále také vedoucímu práce panu prof. Ing. Jaroslavovi Novákovi, CSc., který byl vždy ochotný konzultovat problémy v průběhu práce. V neposlední řadě mé díky patří i panu Ing. Ladislavovi Mlynaříkovi, Ph.D. za spolupráci v přípravě podkladů vlaků z energetického modelu.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá obsluhou výpočetního modelu, který simuluje zatížení napájecích stanic v definované lokalitě. Nejprve je popsán krátký úvod k měničovým napájecím stanicím a uvedení sledované oblasti tratí. Následně práce obsahuje informace pro práci s výpočetním modelem, způsob organizace vstupních a výstupních dat. Dále je shrnut postup při tvorbě dopravních scénářů, uspořádání jednotlivých vlaků v jízdních řádech a definice uvažovaných vlaků na trati. Poslední část práce hodnotí výstupy z modelu a jejich smysluplnost. Interpretuje výsledky a na jejich základě činí závěry.

Klíčová slova

Trakční napájecí stanice, statický frekvenční měnič, soustava 25 kV AC 50 Hz

Title

Traction load analysis of converter supply stations 25 kV 50 Hz

Annotation

This master thesis deals with the operation with the computational model which simulates load of the power supply stations in defined location. First of all, there is short introduction of converter supply stations and description of examined rail structure. Thesis then contains instructions of working with model and approach to the input and output data. Next follows process of creating traffic scenario and definition of trains. Last part evaluates outputs of the model and based on that interprets conclusions.

Keywords

Traction power supply, static frequency converter, 25 kV AC 50 Hz system

Obsah

Úvod.....	9
1 Měničové napájecí stanice.....	10
1.1 Popis.....	10
1.2 Aplikace v praxi	12
2 Rozbor dat	14
2.1 Vývoj výpočetního modelu.....	14
2.2 Situace v SV Čechách	14
3 Výpočetní model	16
3.1 Stručný popis.....	16
3.2 Vstup pro model.....	17
3.3 Výstup modelu	19
3.4 Dopravní scénáře.....	21
3.5 Předpoklady.....	21
3.5.1 Charakteristika vstupních dat.....	21
3.5.2 Charakteristika vozidel	22
3.5.3 Jízda vozidel	24
4 Tvorba dopravních scénářů	26
4.1 Ranní scénář	26
4.1.1 Jízdní řád osobních vlaků	26
4.1.2 Jízdní řád nákladních vlaků	27
4.1.3 Křižování vlaků.....	28
4.1.4 Příklad vymodelovaného vlaku	28
4.2 Odpolední scénář.....	30
4.2.1 Jízdní řád.....	30
4.2.2 Křižování vlaků.....	31
4.2.3 Příklad vymodelovaného vlaku	31

5	Výpočet modelu.....	32
6	Zhodnocení výstupů	33
6.1	Ranní scénář	33
6.2	Odpolední scénář.....	42
6.3	Rekuperace	49
6.4	Měničové napájecí stanice	50
	Závěr	53
	Použitá literatura	54
	Seznam obrázků.....	55
	Seznam tabulek	56
	Seznam příloh	58

Úvod

Elektrifikované tratě patří mezi významnou součást železniční infrastruktury. V České republice jsou všechny hlavní koridory elektrifikované. V dnešní době, kdy je kladen velký důraz na udržitelnost dopravy, se význam elektrické energie pro pohon dopravních prostředků stále prohlubuje. Mnohdy nastává situace, že je lepší upřednostnit vzdálenější trasu s elektrickou trakcí před kratší cestou s motorovou trakcí. Elektrifikované tratě nabízí znatelné výhody, především možnost dosažení vyšších přepravních výkonů u nákladních vlaků.

Za tímto účelem je plánovaná elektrifikace tratí v severovýchodních Čechách. V části této oblasti je silná nákladní doprava díky automobilovému průmyslu. Zároveň se nepředpokládá, že by v budoucnu došlo k útlumu, naopak. Zvýšení přepravního výkonu by výrazně pomohlo odlehčit hlavní nákladní koridory a celkově by došlo ke zefektivnění dopravy. Stejně tak by železnice posílila v konkurenčním boji s ostatními způsoby přepravy v této lokalitě. Přičemž přesun z kamionové dopravy na železnici je obecně žádaný směr vývoje i z hlediska šetrnosti k životnímu prostředí.

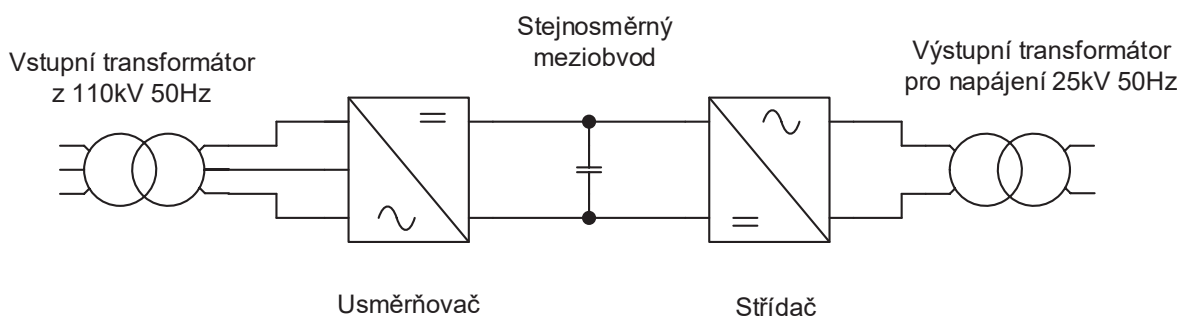
Pro budoucí realizaci je nutné vytvořit analytický rozbor v dané oblasti, aby s přihlédnutím k těmto výpočtům mohly být korektně dimenzovány parametry napájecích stanic.

1 Měničové napájecí stanice

1.1 Popis

Pro zvýšení efektivity a pro uspokojení zvyšujících se nároků na odebíranou energii z veřejné distribuční sítě již nedostačuje použití jednoduchých transformátorových napájecích stanic. Proto je nutné použití modernějších technologií v podobě vysokonapěťových měničů, které byly dříve nedostupné především kvůli nedostatečným spínacím prvkům. Ty nedosahovaly potřebných hodnot pracovního napětí. Nyní ovšem moderní měniče již jsou schopny zajišťovat napájení i na napěťové soustavě 25kV, 50Hz. Na vývoji a následné výrobě pracují přední výrobci v oblasti elektro (např. švýcarské Hitachi ABB Power Grids nebo německý Siemens).

Měničová napájecí stanice má o něco složitější strukturu. Základní zapojení dle bloků je vidět na obrázku 1. Na vstupu 110kV je trafo, nicméně jsou připojeny všechny fáze (oproti konvenčnímu způsobu zatížení pouze dvou fází). Za vstupním trafem se nachází vysokonapěťový měnič, který má za úkol vytvořit říditelné jednofázové napětí. Ze sekundární strany měniče je napětí dále pomocí zvyšujícího transformátoru upraveno na jmenovitou hodnotu či požadovanou hodnotu napětí v troleji.



Obrázek 1 Blokové schéma měničové napájecí stanice [2]

Použití říditelného měniče nabízí mnoho výhod. Klasická napájecí stanice zatěžuje přenosovou síť nerovnoměrně. S aplikací měniče jsou využity všechny tři fáze najednou. Napětí je nejprve řízeným usměřňovačem upraveno na stejnosměrné. Z DC meziobvodu následně střídač vytvoří požadovanou jednu fázi. Toto přináší velkou výhodu pro energetiku a odpadá tedy střídání zatížení pouze dvojic fází.

Výhodou měničové napájecí stanice je tvrdost napětí na výstupu. V případě transformátorové napájecí stanice vlivem vnitřní reaktance dojde k poklesu napětí při zatížení.

To je nežádoucí chování. Naopak díky říditelnosti měniče je možné udržovat stálé napětí v místě napájení. Dojde tak k ušetření energie a k lepší stabilizaci napětí v troleji.

Další podstatnou předností je možnost vytvoření napětí s libovolnou fází. Sousední měničové stanice tedy mohou vytvořit jednotnou napájecí fázi a řeší tím problém propojení dvou úseků dohromady. Stanice ovšem spolu musí komunikovat a při jejich jednotlivém připínání je nutné vždy nejprve zajistit přenos informací proto, aby nově připojená napájecí stanice synchronizovala svou fázi. Při nedodržení by mohlo dojít k prudkému nárůstu vyrovnávacích proudů. Pokud je ovšem jen drobný nesoulad posunutí fáze mezi napájecími stanicemi může to být zároveň výhodou. Díky tomu je možné vyvolat vyrovnávací proudy například při nepříznivých vlivech počasí a odstranit námrazu na trakčním vedení. Snadno se tímto způsobem také dá řídit zatížení konkrétních napájecích stanic. Posun fáze se pohybuje v jednotkách stupňů. Vliv posunu fáze mezi dvěma napájecími stanicemi je přiblížen v ročníkovém projektu II, kde jsou provedeny simulace zatížení či účinnosti v závislosti na úhlu posunu fází. [2]

Jednotná fáze dále odstraní jednostranné napájení a vytváří mřížovou síť. V případě poruchy je tok výkonu do poruchy v různých směrech. Napájecí stanice mohou být situovány dále od sebe než doposud a na souvislé trati s touto napájecí soustavou není třeba vypínat odběr trakčního proudu. Neutrální pole jako místa bez napájení v běžném provozu zaniknou a oddělovací styky budou překlenuty.

Oboustranné napájení přináší velké výhody zejména z hlediska nižších ztrát při zatížení trolejového vedení. Napětí je při maximálním zatížení nejnižší uprostřed úseku a zároveň neklesá na tak nízké hodnoty jako při jednostranném napájení. Pokud je v jednostranném napájení délka úseku 40 km je napětí na konci úseku při daném odběru pořád nižší, než při délce úseku 80 km u oboustranného napájení.

Další předností oboustranného napájení je také snadnější možnost odhalit zkrat. Se zavedením vazby sousedních napájecích stanic tak lze vypnout celý napájený úsek a nedochází k nebezpečným situacím. Při jednostranném napájení musí být nadproudová pojistka nastavena na vysokou úroveň proudu. Stanice tak může udržovat vzdálený zkrat, aniž by ho nadproudová pojistka odhalila (zkratový proud může být vlivem velké vzdálenosti, a tedy větší impedance vedení, nižší a blízký hodnotě maximálnímu povolenému proudu pro odběr do zátěže). Rychlovypínač se proto nevybaví a stanice není schopna tuto nebezpečnou situaci vůbec rozpoznat. K těmto situacím ale dochází spíše na stejnosměrném napájení. Ve střídavých

napájecích systémech zpravidla tečou mnohem nižší proudy díky vyššímu napětí. Navzdory nižším proudům ve střídavých napájecích systémech je i tak žádoucí oboustranné napájení pro snížení ztrát ve vedení, případně pro prodloužení vzdáleností mezi jednotlivými napájecími stanicemi.

Při použití měničové technologie je možné efektivně řídit průběhy napětí a proudu. Jedná se o čtyřkvadrantové měniče. Lze tak dosáhnout obou polarit a směrů napětí a proudu. Můžeme vytvořit přesný odběr se zadaným účíníkem. Filtračně kompenzační zařízení proto v napájecí stanici pozbývají smysl. Tím dojde k velké úspoře energie. Tato funkce se uplatní i při postupném zavádění měničových stanic do železniční infrastruktury. Pokud bude nová napájecí stanice s SFC technologií připojena k úseku s konvenční transformátorovou napájecí stanicí, je možné v této stanici odepnout FKZ (měniče z ostatních napájecích stanic se postarají o kompenzaci). SFC dokáže pracovat i s kapacitním účíníkem. Znamená to, že tak může nejen kompenzovat zařízení na železniční infrastruktuře, ale i přímo dodávat kapacitní jalový výkon, pokud bude nutné kompenzovat distribuční síť. Při větším počtu měničových napájecích stanic tato kompenzace již nemusí být zanedbatelná.[2]

FKZ není nutná ani pro odstranění vyšších harmonických (typicky slouží k odfiltrování 3. a 5., případně i 7. harmonické složky [8]). Vyšší harmonické způsobí deformaci napěťové křivky. Pro tento účel mají měničové napájecí stanice filtry harmonických, dle nutnosti aplikace, jak na třífázovém vstupu, tak na jednofázovém výstupu.

Technické řešení vysokonapěťového měniče pro trakční účely je podrobněji popsáno v ročníkovém projektu II. [1]

1.2 Aplikace v praxi

Měničové napájecí stanice jsou nyní nastupující novinkou. V České republice bude první nasazení na druhém železničním koridoru v rámci prodloužení napájecího systému 25kV 50 Hz na úkor úseku se stejnosměrným napájecím systémem 3kV. K této transformaci by mělo v průběhu let dojít na všech tratích s trakční soustavou 3kV DC. Nyní se jedná konkrétně o stavbu měničové napájecí stanice v Otrokovicích, kde budou instalovány dva trakční měniče s výkonem 15 MVA a dále napájecí stanice v Říkovcích s jedním měničem. Styk systémů 25kV 50 Hz AC a systému 3kV DC se tak posune ze současných Nedakonic.

Výhodou měničových stanic je možnost libovolného nastavení fáze. Díky tomu lze do sítě společně s SFC zapojit jeden vybraný transformátor. Měniče tak budou na stejné fázi jako

bližší vývod ze stanice v Nedakonicích. Zároveň nebude zapojeno FKZ. Spolupráce FKZ s SFC není ověřena a hrozí vznik rezonančních jevů. SFC dále není schopen generovat zkratový proud, na rozdíl od konvenčního transformátoru. Maximální poruchový proud SFC je přibližně roven jeho jmenovitému proudu, řídicí logika SFC na zkrat reaguje poklesem výstupního napětí. [7]

Jedná se o první nasazení v rámci střední Evropy. Pro případné problémy v provozu je vyhrazena tříměsíční zkušební doba. Po tuto dobu bude v napájecích stanicích přítomno i klasické trafo, které v případě potřeby zastoupí měnič tak, aby nebyl významně narušen provoz při komplikacích. Při případném využití záložního trafua se již neřeší kompenzace odběru jalového proudu a vyšších harmonických. Záložní filtračně-kompenzační zařízení po dobu testování nebude instalováno (dle domluvy s distributorem elektrické energie).[7]

Nasazený měnič je rozdělen do několika částí[7]:

- Třífázový (3 AC) transformátor SFC
- Kontejner SFC (včetně měniče, řídicí a chladič jednotky, přednabíjecí jednotky)
- Cívka 100 Hz SFC (DC link)
- Dochlazovací jednotka SFC (tepelný výměník voda-vzduch)
- Jednofázový (1 AC) transformátor SFC
- Filtr harmonických na jednofázové straně (1 AC)
- Pro filtr harmonických na třífázové straně je ponechána prostorová rezerva.

Pro tuto aplikaci budou použity měniče od dříve zmíněné firmy Hitachi-ABB (středisko v Turgi), která již má zkušenosti například s realizací SFC (Static Frequency Converter) v australském Brisbane ve stanici Wulkuraka. Tato venkovní stanice je dimenzována na výkon 20 MVA. Jedná se o modulární systém s IGCT prvky instalovaný v roce 2015. Výstupní napětí je jednofázové 25 kV, 50 Hz. Stejně jako v případě trati Nedakonice – Říkovice se jedná o měnič z typové řady PCS 6000 Rail.[3]

2 Rozbor dat

2.1 Vývoj výpočetního modelu

Práce navazuje a zapadá v širším kontextu na studie prováděné katedrou KEEZ na Dopravní fakultě Jana Pernera. Cílem je nastínit očekávání od elektrifikace, návrh a zatížení napájecích stanic, jejich umístění a další parametry pozorované při modelovém provozu, které přispějí k objasnění problémů při budoucí realizaci.

Na KEEZ byl vytvořen obecný teoretický model pro výpočet zatížení napájecích stanic v libovolné struktuře. Model není omezen počtem vlaků ani počtem napájecích stanic. Výstup má za cíl analyzovat odběr z virtuálních napájecích stanic. Dále je možné pozorovat účinnost, ztráty nebo vliv rekuperace. Výhodou je také schopnost nastavit různý fázový posun mezi měničovými stanicemi a porovnávat tak jeho vliv na rozložení odebíraného výkonu uvnitř struktury. Fázový posun zatím není plně implementován do výpočetního skriptu.

2.2 Situace v SV Čechách

Nyní se zkoumá možnost elektrifikace železničních tratí v severovýchodních Čechách. Na katedře KEEZ byla navržena koncepce elektrifikace ve dvou etapách.

Výše zmíněný model bude použit pro vymodelování dopravní situace na železničních úsecích náležících do první etapy, které tvoří malou ucelenou síť se dvěma napájecími stanicemi. Celkový rozsah, se kterým se bude uvažovat v rámci výpočtu pro zatížení, zahrnuje tyto čtyři úseky (netvoří celou první etapu):

- Děčín-východ – Jablonné v Podještědí
- Česká Lípa hl.n. – Bakov nad Jizerou
- Bakov na Jizerou – Mladá Boleslav hl.n.
- Mladá Boleslav hl.n. – Nymburk hl.n.

Úsek Bakov nad Jizerou – Liberec, který ještě náleží do první etapy nebude v modelu uvažován. Celkově se jedná o 140 km železničních tratí. Pro první etapu byly zvoleny nejvytíženější úseky v lokalitě, které mají celostátní význam, ať už z pohledu osobní dopravy, tak i dopravy nákladu. Vyjma stanic a výhyben je trať jednokolejná.

Do druhé etapy pak patří mimo jiné úseky navazující na tyto tratě. Jedná se o pokračování z Jablonného v Podještědí dále, až do Liberce. Elektrifikace tohoto úseku bude vlivem horších terénních podmínek náročná, a proto není celý úsek Děčín – Liberec zahrnut do jedné etapy. Dále také trať z České Lípy ve směru na Rumburk. Po realizaci první etapy se na

těchto úsecích bez elektrické trakce počítá s provozem hybridních vozidel, především v osobní dopravě, které budou v elektrifikovaných částech tratí doplňovat energii do akumulátorů.

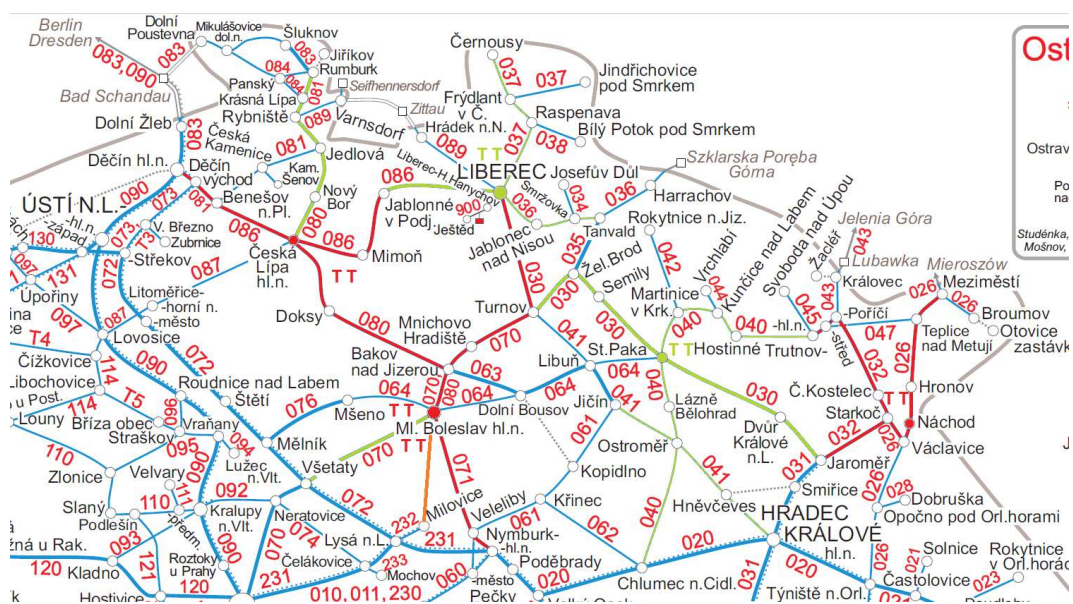
Napájecí stanice budou umístěny ve stanicích Mladá Boleslav a Česká Lípa, přičemž v první jmenované stanici bude konvenční transformátorová napájecí stanice a v České Lípě měničová. Toto stanovení proběhlo v rámci přípravné studie na KEEZ. Pro stanovení lokality byly brány v potaz tyto energetické faktory:

- Dostupnost distribuční soustavy 110kV
- Dostatečný zkratový výkon soustavy 110kV v místě připojení
- Dostatečná výkonová rezerva soustavy 110kV v místě připojení
- Rovnoměrné energetické pokrytí trakční soustavy 25kV v lokalitě aplikace

[4]

Z důvodu energetické dostupnosti je vždy jakákoliv změna nebo návrh řešení napájecích stanic koordinována ve spolupráci s distributorem elektrické energie (u nás ČEZ nebo E-ON).

Konkrétní definici obou zmiňovaných etap je možné vidět na obr. 2. Červeně je zvýrazněna elektrifikace v první etapě. Světle zelená barva ukazuje plán pro druhou etapu.



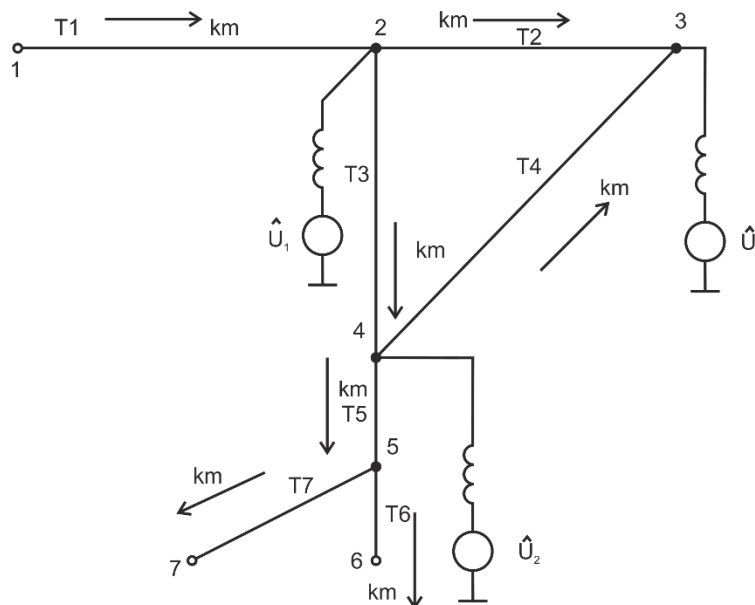
Obrázek 2 Výhledová mapa elektrifikace v severovýchodních Čechách [4]

Obecně je volba umístění napájecí stanice ovlivněna i jinými faktory, například dle délky napájených úseků (typicky 40-50 km u střídavé trakce při jednostranném napájení) a vzdálenosti od sousední napájecí stanice. Pro tyto záměry je nutné provést příslušné energetické výpočty a dimenzování, které určí i parametry stanic.

3 Výpočetní model

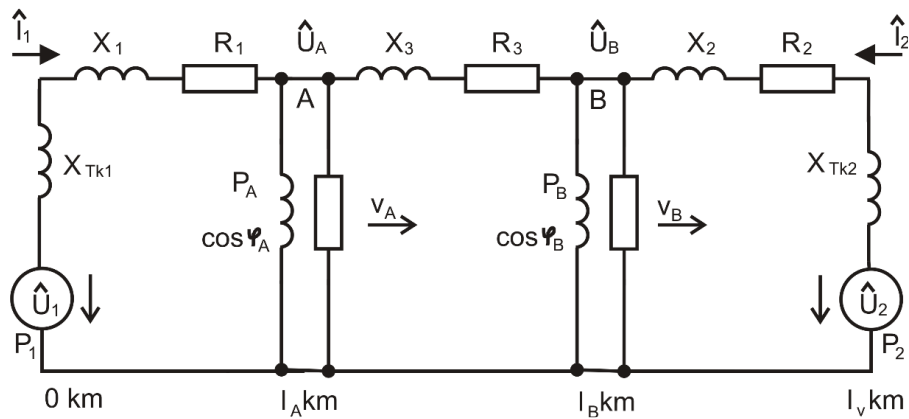
3.1 Stručný popis

Výpočetní model je vyvinut v prostředí Matlab. Model nejprve vytvoří ze zadaných parametrů síť, po které se pohybují vlaky. Struktura může vypadat jako na obrázku 3. Program zanedbává kapacity a svody vedení. Zároveň je zanedbána impedance kolejí, zpětné vedení pro trakční proud je chápáno jako jeden společný uzel na stejném potenciálu. Každý vlak tak vytváří uzel se třemi větvemi. Dvě větve pro vedení z obou stran a jedna větev pro zpětný proud do kolejí. Pokud by nastalo umístění dvou vlaků v jednom konkrétním místě, program si vlaky posune tak, aby se nepřekrývaly. Stejně tak dojde k posunu, pokud bude vlak přímo v uzlu traťového větvení.



Obrázek 3 Topologie pro výpočetní model [4]

Přechodové jevy jsou zanedbány, uvažuje se také pouze odběr první harmonické složky napětí a proudu. Vlaky jsou reprezentovány jako paralelní kombinace odporu a indukčnosti. Vedení pak představuje sériově zapojená indukčnost a odpor. Náhradní schéma dvou vlakových souprav mezi dvěma napájecími stanicemi na jednom traťovém úseku ukazuje obrázek 4.



Obrázek 4 Náhradní schéma dvou vlaků v jednom úseku [2]

Data pro obsluhu modelu jsou detailněji rozebrána v následujících kapitolách. Vstupní data jsou popsána v zadávacím formuláři, který pevně stanoví trasu vlaků a polohu napájecích stanic. Výstupem 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
- pozicích vlaků
- napětí vlaků na sběrači[4]

Program nekontroluje správnost zadání, 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. Za účelem snížení doby výpočtu na úkor přesnosti je vytvořen doplňkový vstupní parametr Perioda analýzy výkonů, který sníží počet vzorků pro výpočet a násobně zkrátí dobu pro výpočet.

3.2 Vstup pro model

Do výpočetního modelu vstupují data, která nejprve musí definovat strukturu tratě a rozmístění napájecích stanic. Následně pak přesně určují pohyb každého vlaku v oblasti. Dále model musí znát předpokládané výkonové dimenzování stanic, jejich typ (měničová x konvenční) a případně parametry ke změně vzájemného fázového posunu.

Pro zadání všech těchto dat byl zvolen tabulkový procesor. Jedná se o nejjednodušší způsob při spolupráci s modelem, který byl naprogramován v MATLABu. V rámci souboru je

vytvořena tabulka, která se nahraje do výpočetního skriptu. Jsou pevně vymezeny oblasti tabulky, jenž specifikují zadání.

Vyplněná první část zadávací tabulky je v tabulce 1.

Traťový úsek č.	Uzel poč. č.	Uzel kon. č.	Délka [km]	Poměr. impedance [Ω/km]
1	1	2	30	$0.26+j*0.55$
2	2	3	9	$0.26+j*0.56$
3	3	4	45	$0.26+j*0.57$
4	4	5	28	$0.26+j*0.58$
5	4	6	28	$0.26+j*0.59$

Tabulka 1 Zadání struktury trati

Je specifikován každý úsek trati. Úsek začíná a končí v uzlech, které jsou taktéž konkrétně označeny. Tímto je docíleno přesné zadání i složitějších napájených struktur. Zadaný případ struktury v tabulce popisuje reálnou oblast, která je graficky vykreslená dle mapky na obrázku 5. Zvýrazněný uzel je místo, kde se nachází napájecí stanice. V tabulce je také uvedena délka každého úseku a předpokládaná impedance vedení na základě vlastností trolejového vedení. Pro tuto aplikaci není uvažováno s rozdílnými parametry trolejového vedení.

Další oblast dat popisuje rozmístění napájecích stanic. 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 parametr pro reaktanci, díky němuž můžeme stanici zcela vyřadit (reaktance blíží se k nekonečnu) anebo považovat za konvenční transformátorovou stanici (nastavení nenulové reaktance). Navrženou situaci v severovýchodních Čechách představuje tabulka 2. Parametr Mezní výkon NS momentálně v modelu není zakomponován a nemá pro výpočet význam.

Napájecí stanice	Uzel č.	Reaktance NS [Ω]	Napětí NS [V]	Mezní výkon NS [MW]
2	2	5	27000	20
4	4	0	27001	20

Tabulka 2 Definování napájecích stanic

Následující data se již týkají konkrétních vlaků pohybujících se po vymezené oblasti trati. Každý vlak pak musí mít zadaný pohyb po trati. Vždy se vyplní daný úsek plus startovní a koncová poloha vlaku v daném úseku. Pokud by vlak jezdil v jednom úseku tam a zpět, musí být zdefinován pro každý směr jeden řádek s tím, že při jízdě opačným směrem bude počáteční kilometr vyšší než koncový kilometr. Pro jízdu vlaku z Jablonné v Podještědí do Děčína bude zadávací tabulka vypadat následovně.

Trasa po trati	Poč. km	Konc. km
5	28	0
4	0	28

Tabulka 3 Trasa konkrétního vlaku

Model v některých případech může zahlásit chybu i přestože je trasa zadána správně. Proto, jak je provedeno i v zadávacích formuláři v příloze, je nutné posunout počáteční a koncový km malinko dovnitř úseku. S tím si už model poradí a simulaci provede. Například u tabulky 3 by to znamenalo přepsat km 28 na 27,99 a 0 zaměnit za 0,01.

Samotná data o aktuálním pohybu vlaku v každé sekundě intervalu jsou pak organizována do tří sloupců, (tab. 4), z nichž první ukazuje momentální rychlost, druhý sloupec příkon vozidla a třetí sloupec charakterizuje účinník, se kterým vozidlo odebírá elektrickou energii. Časový interval je vždy po 1 s a model s jiným zadáním nepočítá.

vlak1 v[km/h]	vlak1 P[kW]	vlak1 cos ϕ
---------------	-------------	------------------

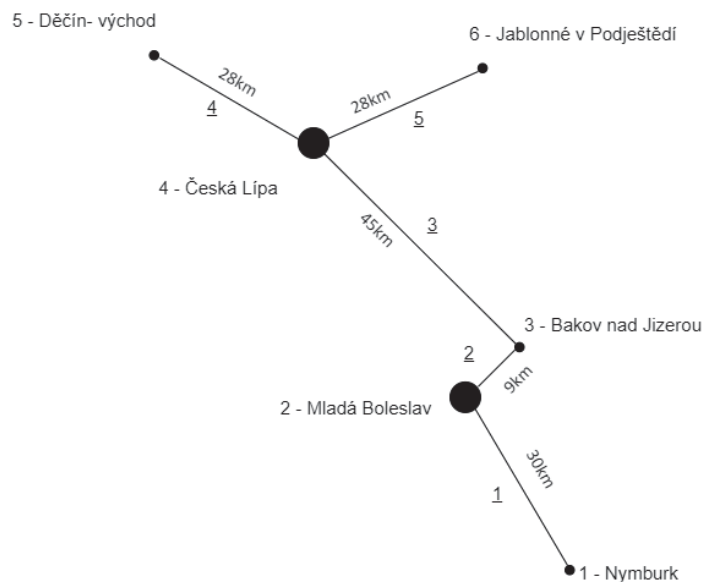
Tabulka 4 Sloupce pro zadání aktuálních dat vlaku

Pro vložení dalších doplňujících parametrů jsou vytvořeny dva sloupce zadání (tabulka 5).

Zadání	Zadání
Krok změny posunu napětí U1 a U2 (stupně)	0.25
Počáteční hodnota napětí pro výpočet imp. vlaku (V)	25000
Perioda analýzy výkonů (min. 1 s) (s)	60

Tabulka 5 Zadání doplňujících parametrů

Grafické znázornění sledované oblasti pak ilustruje obr. 5. Je určeno, která stanice tvoří uzly ve struktuře. Označení úseku je podtrženo a doplněno o délku úseku.



Obrázek 5 Mapa přiřazující čísla uzlů a úseků konkrétním místům

3.3 Výstup modelu

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

V prvních dvou sloupcích je stanovena časová základna v sekundách a minutách pro celý zkoumaný interval. Jedná se o vzorky s periodou nastavenou v zadání. Následující sloupce obsahují souhrnné informace náležící celému úseku. Nejprve jsou údaje o účinnosti [%] a ztrátách [kW]. Další dva sloupce porovnávají celkový příkon a výkon, rozdílem těchto dvou veličin se určují celkové ztráty. Dále tabulka pokračuje výčtem hodnot celkového příkonu vlaků a napájecích stanic. Stejná data jsou následně přepočtena do celkových energií v kWh. Údaje o energii se získají vždy integrací příslušného výkonu. Celková energie spotřebovaná obsahuje veškerou energii, která byla spotřebována na jízdu vlaků. Celková energie dodaná vypíše stejný údaj povýšený o ztráty. Celková energie napájecích stanic je hodnota, která uvažuje příkon stanic. Pokud stanice rekuperují, energie se snižuje. Zároveň pokud vlaky rekuperují vzájemně mezi sebou, tak se to na velikosti energie neprojeví. Model uvažuje pouze rozdíl na úrovni napájecí stanice (energie přebývá/je nutno dodat) těchto výkonů a přepočte je na energii. Celková energie vlaků pak udává hodnotu po odečtení ztrát na vedení. Celková energetická účinnost dá do poměru celkovou energii dodanou a celkovou spotřebovanou energii a určí procentuální efektivitu využití energie.

Další část výsledkové tabulky již obsahuje konkrétní informace, nikoliv souhrnné. Analyzuje každou napájecí stanicí a zobrazí data o momentálním příkonu [kW], energii [kWh] a proudu [A] dané stanice. Napájecí stanice jsou následovány hodnotami k jednotlivým vlakům. Každý vlak má čtyři sloupce. První sloupec odkazuje na aktuálně pojížděný úsek ve struktuře tratí. Další dva sloupce zobrazují aktuální polohu vlaku v daném úseku a celkovou uraženou vzdálenost. V posledním sloupci je momentální napětí na sběrači vlaku.

Tabulku končí sloupce s popisem napětí [kV] v jednotlivých uzlech zadaných do traťové struktury, kde pro každý uzel je vytvořen jeden sloupec.

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 6 Příklad vybraných sloupců výsledkové tabulky

3.4 Dopravní scénáře

Cílem je co nejpřesněji napodobit reálné zatížení tratě. Ze struktury zadávacího formuláře vyplývá, že každý vlak je definován zvlášť, a proto je nutné vytvořit kompletní jízdní řád pro zkoumaný interval. Dopravní scénář bude zahrnovat jak osobní, tak nákladní vlaky, přičemž musí řešit křižování vlaků na trati. Není uvažováno žádné zpoždění vlaků.

Pro větší přehlednost jsou do formuláře přidány sloupce s reálným časem v hodinovém formátu, který doplňuje uplynulý čas v sekundách a urychluje orientaci při hledání vlaků v čase.

3.5 Předpoklady

3.5.1 Charakteristika vstupních dat

Jsou vytvořeny dva dopravní scénáře pro zkoumání tratí v severovýchodních Čechách na zmíněných úsecích. Jejich cílem je zvýraznit špičkový provoz tak, aby bylo možné simulovat nejkritičtější variantu zatížení napájecích stanic. Byly vybrány dva časové intervaly v průběhu pracovního dne, každý o délce dvou hodin. Jedná se o interval ráno od 7 hodin do 9 hodin a interval odpoledne od 15 hodin do 17 hodin. V těchto časech je předpoklad největšího zatížení trati v rámci osobní dopravy, z důvodu migrace obyvatel za prací.

Každý dopravní scénář je odvozen od skutečného provozu v dané oblasti na základě odečtu vlaků z grafikonu vlakové dopravy. Nicméně pro zjednodušení byly osobní vlaky sjednoceny tak, aby zastavovaly vždy stejně, a to v obou směrech. Ke stejné úpravě došlo i u rychlíků. Kompletní seznam zastávek u všech osobních vlaků a rychlíků prezentuje tabulka 7.

	Os	R
Nymburk hl.n.	x	x
Veleliby	x	
Vých Straky		
Všejanya z	x	
Čachovice	x	
Luštěnice-Újezd		
Luštěnice z	x	
Voděradý z	x	
Dobrovice	x	
Nepřevázka z	x	
Vých Bezděčín		
Mladá Boleslav hl.n.	x	x
AHr Podlázky		
Mladá Boleslav-Debř	x	
AHr Dalešice		
Bakov nad Jizerou	x	x
Malá Bělá z	x	

	Os	R
Jablonné v Podješt.	x	x
Velký Valtinov z	x	
Brniště	x	
Velký Grunov z		
Pertoltice p. Ral. z	x	
Mimoň	x	x
Zákupy-Božíkov z	x	
Zákupy		
Vlčí Důl-Dobranov z		
Vých Žiznínov		
Česká Lípa hl.n.	x	x
Č.Lípa-Holý vrch z	x	
Stružnice	x	
Horní Police	x	
Žandov z	x	
Starý Šachov z	x	
Františkov n. Plouč.	x	

Bělá p.Bezd. zast. z	x	
Bělá pod Bezdězem	x	x
Bělá p.Bezd. město z	x	
Bezděz	x	
Okna	x	
Doksy	x	x
Staré Splavy z	x	
Jestřebí	x	
Srní u České Lípy		
Česká Lípa hl.n.	x	x

Benešov n. Ploučnicí	x	x
Malá Veleň z	x	
AHr Soutěska		
Březiny u Děč. z	x	
Děčín východ	x	x

Tabulka 7 Předepsané zastavení pro rychlíky a osobní vlaky

Četnost vlaků osobní dopravy tak byla zachována, nicméně četnost nákladních vlaků bude uvažována vyšší. Vzhledem k měnícímu se rozložení zatížení tratě nákladem v průběhu dne nelze přesně dodržet v daných intervalech žádané zvýšení přepravního výkonu. Požadavek na zvýšení nákladní přepravy pro všechny úseky je trojnásobek vyjma tratě Nymburk – Mladá Boleslav, kde se počítá se zvýšením 1,5x.

Stanovení nákladních vlaků do dopravního scénáře pak proběhlo koordinací dvou způsobů. První varianta výpočtu zahrnuje vynásobení celkového počtu a hmotnosti nákladních vlaků za den v poměru příslušným násobičem tak, aby došlo k výsledku zaokrouhleném na celé vlaky. Následně byl proveden přepočít na vymezený časový interval. Druhý způsob pak kopíroval odečet vlaků z grafikonu již v daném intervalu a následně navýšení o příslušný násobitel.

Celkově je v každém scénáři počítáno s cca třiceti až čtyřiceti vlaky, přičemž dvě třetiny tvoří vlaky osobní dopravy a zbylá část představuje dopravu nákladní. Podíl nákladních vlaků ve scénářích se liší. Vzhledem k povaze výpočetního modelu musí být každý vlak v zadávací tabulce definován po celou dobu pozorovaného intervalu i přesto, že bude v části intervalu odstaven. To se v tabulce projeví tím, že v době, než vlak vyjede, případně po dojezdu vlaku do cílové stanice, bude vyplněna nulová rychlost vozidla ovšem s malým, nenulovým odběrem. Vzhledem k množství dat pro zpracování byla, za účelem zvýšení efektivity, vytvořena makra v prostředí MS Excel sloužící ke snadnější úpravě surových dat z energetického modelu. Pro práci s daty byl taktéž použit rozšiřující modul pro Excel zvaný Kutools. [9]

3.5.2 Charakteristika vozidel

Stejně jako došlo ke zjednodušení a sjednocení zastavení vlaků, tak i fyzické parametry vozidel u osobních vlaků jsou uvažovány ve všech případech stejné. Jedná se o dvouvozový RegioPanter. Toto vozidlo je moderní elektrická jednotka, která má už nyní velké zastoupení na tratích v České republice. V případě nenasazení těchto souprav se dá předpokládat, že by

jiné soupravy měly podobné parametry. U rychlíků pak pro model poslouží stejná souprava dvakrát, sprážená do jednoho rychlíkového vlaku.

3.5.2.1 Vozidlové odpory

Každé vozidlo pohybující se na trati má vozidlové odpory z jízdy. Pro matematickou definici těchto odporů se používá empirický vzorec

$$F = A + Bv + Cv^2 \quad (1)$$

Tento vztah obsahuje koeficienty A , B a C , což jsou jednotlivé složky odporu a v je rychlost vozidla. První koeficient A je nezávislý na aktuální rychlosti, je konstantní a představuje odpor z valení kola a tření v ložiskách. Koeficient B je lineárně závislý na rychlosti, většinou se jedná o nízké hodnoty a je možné celý člen v rovnici zanedbat. Tento přídatný odpor vzniká vlivem jízdy po nerovné trati, kdy dochází k nežádoucímu rozkmitání vozidla. Poslední koeficient C je kvadraticky závislý na rychlosti a určuje odpor způsobený třením vzduchu. Tato složka závisí na hustotě vzduchu, čelní ploše vozidla a součiniteli tvaru vozidla C_x , který definuje tvar vozidla. V minulosti se na tvar vozidla nebral příliš velký ohled, skříňe byly hranaté a mnohdy i zkosené proti směru jízdy, což velmi negativně ovlivňuje spotřebu. Nicméně moderní vozidla se snaží tvar čelní plochy přizpůsobit tak, aby byl součinitel tvaru vozidla co nejnižší a úspora spotřebované energie vysoká. Konstruují se zaoblené tvary se sklonem po směru jízdy. [5] Nejideálnější tvar pro odpor vzduchu lze v přírodě nalézt u padající kapky vody, která je ovšem pro konstrukci vozidel nedosažitelná.

Souprava jednoho dvouvozevého RegioPantera má hmotnost 110 tun. Střední hodnota příkonu pomocných pohonů činí 50 kW. Jako tažná síla pro zrychlování v konstantní části trakční charakteristiky se počítá se 120 kN. Při rekuperaci je vlak brzděn silou 128 kN. Zpomalení probíhá s odrychlením $a = -1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Měrný jízdní odpor činí $1 + 0,00038 v^2$.

Nákladní vozidla do jedné kategorie shrnout nelze. Zároveň hmotnost nákladního vlaku významně mění přepravní výkon a energetickou náročnost, proto budou použity nákladní vlaky ve třech kategoriích hmotnosti, a to 500, 1000 a 1500 tun. Při zrychlování z nulové rychlosti je tažná síla na konstantní části obálky trakční charakteristiky 270 kN. Jedná se o hodnotu jak pro zrychlování, tak pro brzdění a je stejná pro všechny tři kategorie hmotnosti nákladních vlaků. Měrný jízdní odpor lokomotivy je $3,52 + 0,002v + 0,00067v^2$, pro zbytek soupravy to činí $0,8 + 0,00015v^2$.

Všechny typy vozidel se pohybují s nejkratšími jízdními dobami. Z toho vyplývá, že fáze výběhu tažného vozidla před zastavením není brána v potaz. S tím je také vázán pohyb

s nejvyšší spotřebou. Poměrný tah je při rozjezdu maximální, 100 %. Vozidlo se pohybuje po obálce trakční charakteristiky.

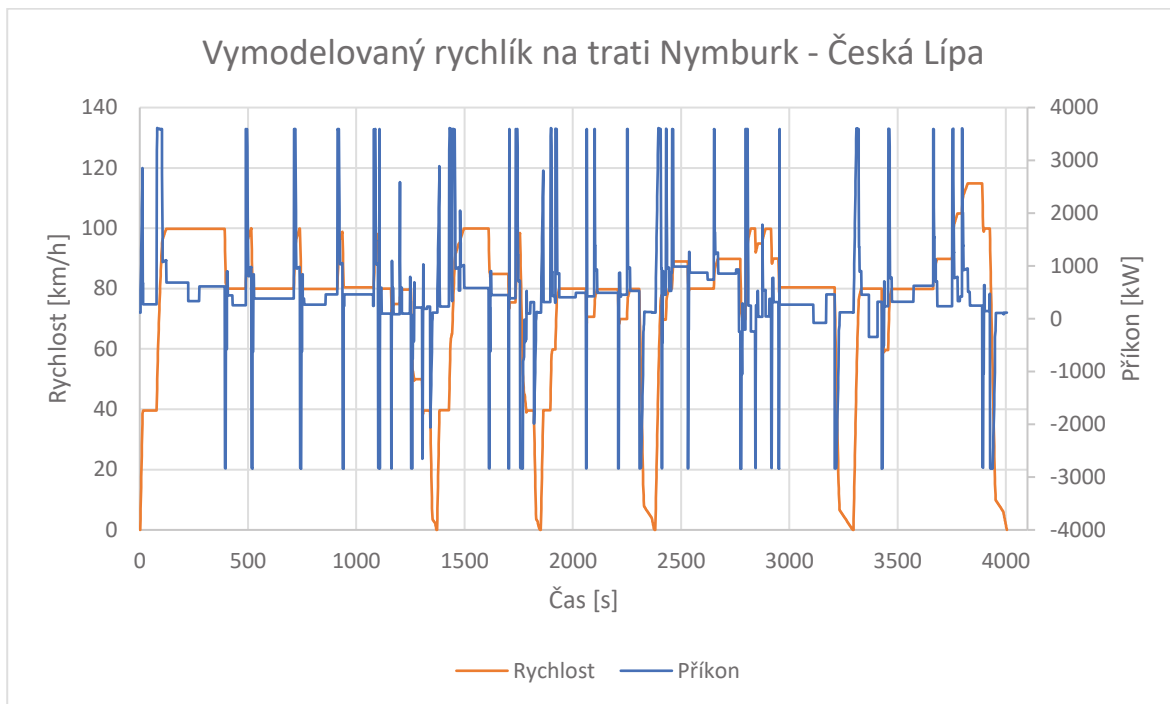
Všechny vlaky pohybující se po trati jsou uvažovány jako zátěž s účínkem jedna, potažmo v zadávacím formuláři je vyplněna hodnota blízká, a to 0,99. Tato úprava je nutná kvůli výpočetnímu skriptu, a ani reálný účíněk moderních hnacích vozidel nedosahuje hodnoty přesně 1.

3.5.3 Jízda vozidel

Data o aktuální rychlosti a spotřebě vlaku vychází z výpočtů energetického modelu, jenž byl vytvořen v rámci dřívějších prací na KEEZ. Model bere v úvahu parametry tratě a vozidla k tomu, aby nasimuloval aktuální příkon vozidla. Úsek tratí, který je zkoumán zde, je pomocí energetického modelu již zpracován. Stejně tak vozidla zahrnutá do dopravního scénáře energetický model zná.

Vymodelovaný osobní vlak v daném směru bude považován vždy se stejným příkonem na trati. Dva osobní vlaky se stejnou dráhou a zastávkami vychází z jednoho modelu, a proto budou jejich data v zadání totožná, jen posunuta v čase. Pokud jiný osobní vlak pojedí pouze částí sledovaného úseku, bude vycházeno opět ze stejných dat, která budou ořezána o nepotřebnou část. Díky sjednocení zastávek tedy není nutné řešit případný průjezd nebo zastávku navíc. V případě potřeby budou pouze doplněna stání vlaků z důvodu křížování, Výhodou v tomto ohledu je inspirace grafikonem, díky čemuž je většina křížení již respektována.

Příklad kompletně vymodelovaného zdrojového vlaku ukazuje graf 6. Jedná se o rychlík z Nymburka do České Lípy. Vlak nemá pobyty v zastávkách, pouze zastaví a ihned se rozjede. Vlak je složen z cca 4000 vzorků po jedné sekundě, což odpovídá 66 minutám a 40 sekundám. Rychlost vlaku je na hlavní ose vlevo, příkon je pak vynesena na vedlejší ose vpravo.



Obrázek 6 Vymodelovaný rychlík na trati Nymburk – Česká Lípa

4 Tvorba dopravních scénářů

4.1 Ranní scénář

Pro výběr ranního špičkového provozu byl zvolen interval od sedmi do devíti hodin. V tuto dobu se na trati nachází jak osobní vlaky, tak nákladní vlaky. Počet vlaků v součtu činí 30. Jedná se o větší počet vlaků, což se negativně projeví na délce výpočtu výpočetního modelu.

Díky dvouhodinovému intervalu mají výsledky lepší průkaznou hodnotu. Kratší intervaly by mohly výsledky zkreslovat. Krajiní časy intervalu mohou být zkreslené. V prvním okamžiku startu intervalu se nepohybuje žádný vlak i přesto, že reálně se na trati pohybují. Vlaky v modelu se rozjíždí vždy až prvním rozjezdem ze zastavení uvnitř intervalu. Stejně tak na konci intervalu dojde k zastavení vlaku v poslední zastávce před koncem intervalu. Je to dáno tím, že by bylo složité přesně určit místo, kde se vlak nachází při startu/konci intervalu. Tato informace je nutná pro zadání do vstupního formuláře. U stanic a zastávek je jejich poloha stanovena.

Data o skutečném jízdním řádě byla čerpána z grafikonu vlakové dopravy na úsecích 537, 540 a 541. Dále ze sešitových jízdních řádů týchž úseků.[6] [10]

4.1.1 Jízdní řád osobních vlaků

Osobní vlaky a rychlíky tvoří větší část vlaků na trati, přičemž vyšší počet je způsoben i tím, že některé vlaky mají krátkou trasu, případně je trasa vedena na kraji časového intervalu a pozorovaná jízda zahrnuje pouze malou část z celkové trasy vlaku. Nicméně díky dvouhodinové délce intervalu těchto případů není tolik.

Pro první časový interval byl vytvořen jízdní řád, jehož příklad ukazuje tabulka 8. Celý jízdní řád v tomto formátu je dostupný v příloze A. Každý vlak je nejprve specifikován svým názvem, který odpovídá zadávacímu formuláři. Čísla vlaků jsou převzata ze skutečného označování spojů. Dále jsou stanoveny stanice počáteční a koncové. Tyto stanice nemusí být skutečný začátek nebo konec vlaku, nicméně jsou nejbližší a první/poslední uvnitř intervalu. V dalším sloupci je pak čas odjezdu z počáteční stanice a čas příjezdu do koncové stanice. Časové informace se povětšinou shodují se skutečným stavem, nicméně pravidlo to není a bylo nutné zavést změny kvůli odlišným jízdním dobám a pro vyrovnání dob při křížení. Zda se jedná o rychlík nebo osobní vlak pak ovlivňuje zastávky, konkrétně dle dříve uvedené tabulky 7.

vlak1	Os 6602	Jablonné v Podještědí	Březiny u Děčína	7:49	9:00
vlak2	Os 6653	Benešov nad Ploučnicí	Děčín-východ	7:03	7:14
vlak3	Os 6600	Malá Veleň	Děčín-východ	7:00	7:08
vlak4	Os 6671	Benešov nad Ploučnicí	Děčín-východ	8:03	8:14
vlak5	R 1342	Jablonné v Podještědí	Děčín-východ	7:07	8:05

Tabulka 8 Část vytvořeného jízdního řádu pro ranní dopravní scénář

4.1.2 Jízdní řád nákladních vlaků

Jízdy nákladních vlaků byly stanoveny tak, aby bylo dosaženo četností a hmotností stanovených dle výpočtu, který byl popsán dříve. Na základě tohoto určení pak byly vlaky rozmístěny po jednotlivých úsecích trati. Trasa a čekání ve stanicích berou ohled na křížení s vlaky osobními. Nesmí dojít ke kolizi na jednokolejné trati, proto je mnohdy čekání na uvolnění trati časově náročné. Nákladní vlaky mohou většinu času strávit čekáním ve stanici, popř. výhybně, tyto provozně nepříjemné situace nastávají často.

Trat'	z GVD	Plán
Děčín – Česká Lípa	1x1000t	2x1000t
Česká Lípa – Bakov nad Jizerou	1x500t	2x500t
Bakov nad Jizerou – Mladá Boleslav	1x1000t	2x1500t
Mladá Boleslav – Nymburk	2x500t, 2x1500t	2x500t, 3x1500t

Tabulka 9 Stanovení četnosti nákladních vlaků v ranním scénáři

Na všech úsecích, a i v obou intervalech byl požadavek množství vlaků splněn. Stejně jak pro osobní vlaky, tak i pro nákladní vlaky byl vytvořen jízdní řád. Opět se nejprve definuje konkrétní vlak v souladu se zadávacím formulářem. Následují počáteční a koncové stanice uvnitř časového intervalu. Nákladní vlaky nezastavují nikde pokud to není specifikováno. K tomu slouží další sloupce, ve kterých je definováno místo zastavení a časový rozsah stání v této stanici, popř. výhybně. Veškerá zastavení nákladních vlaků jsou pouze z důvodu vyčkání na volnost tratě, není počítáno s případnou nakládkou či vykládkou vozů.

				Pobyt ve stanicích kvůli křížení		Hmotnost vlaku [t]
vlak20	Děčín-východ – Česká Lípa	7:30	8:57	Benešov nad Ploučnicí 7:39-8:10	Stružnice 8:24-8:50	1000
vlak21	Česká Lípa – Děčín-východ	7:00	8:18	Stružnice 7:06-7:25	Benešov nad Ploučnicí 7:38-8:10	1000

Tabulka 10 Ukázka jízdního řádu nákladních vlaků

Část nákladních vlaků, stejně jako osobní vlaky, vychází z grafikonu vlakové dopravy. Nicméně kvůli zvyšování předpokládané přepravy je potřeba další vlaky doplnit. Proto je větší část vytvořena s novým jízdním řádem, který respektuje křížení a kombinuje splnění cíle pro přepravní výkon se snahou o maximální dobu jízdy v daném úseku při minimalizování pobytů

ve stanicích. Nákladní vlaky byly vymodelovány s již předpokládanými zastaveními, ručně potom doplněny o časové rezervy v místech křížení s ostatními vlaky.

4.1.3 Křížování vlaků

Pro zajištění správného křížení ve sledovaném intervalu, byla všechna křížení osobních vlaků, po odečtu z grafikonu, zaznamenána do tabulky a postupně kontrolována vždy v časové posloupnosti od dřívějších křížení po pozdější. To z důvodu případných úprav jízdnicích dob vlaku daných změnou pobytů v zastávkách. Při zjištěné kolizi byl vždy jeden z vlaků zpožděn prodloužením pobytů v zastávkách. Pokud by nebyla dodržena posloupnost řešení křížení, úpravy dřívějšího křížení by způsobily opět kolizi v pozdějším místě křížení.

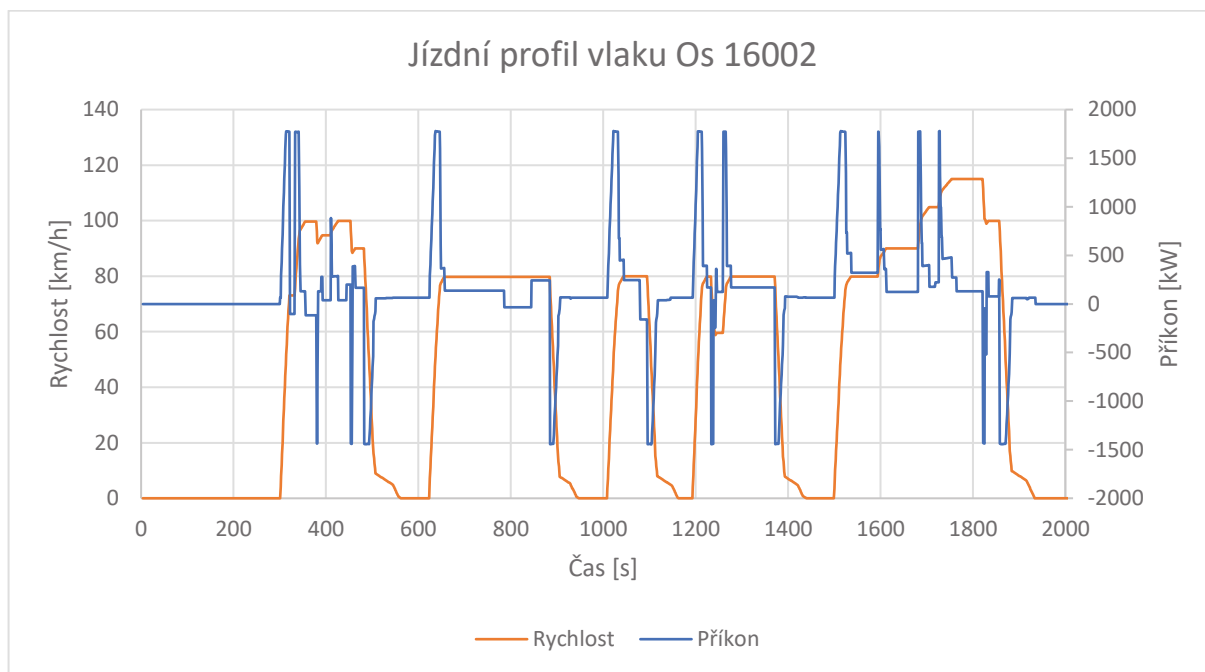
Brniště	7:57	OK	6605-vlak6	6602-vlak1
Benešov nad Ploučnicí	7:57	OK	1342-vlak5	1343-vlak7

Tabulka 11 Příklad křížení vlaků ranního scénáře

Křížení nákladních vlaků není zaneseno do tabulky, jelikož jejich jízda nevychází ze skutečného grafikonu. Křížení bylo rovnou navrženo tak, aby respektovalo jízdnicí doby osobních vlaků.

4.1.4 Příklad vymodelovaného vlaku

Výsledný zadávací formulář pak obsahuje velké množství dat představující jízdu každého vlaku v každé sekundě z celého intervalu. Vlaky byly sestaveny ze vzorových průběhů vymodelovaných energetickým modelem. Příklad hotového vlaku znázorněného v závislosti rychlosti na čase ukazuje graf na obrázku 7. Vlak 16002 je osobní, uvažuje se tedy jedna dvouvozová souprava RegioPanter.



Obrázek 7 Graf jízdního profilu vlaku Os 16002

Z kompletního průběhu vymodelovaného vlaku byla vyňata část, která byla poté umístěna do časového intervalu, dle jízdního řádu. Byly doplněny časové intervaly pro pobyt v zastávkách. V tomto konkrétním případě se jedná o vlak jedoucí z Bezdězu do České Lípy. Na grafu je vidět dynamika jízdy, vlak se vždy snaží dosáhnout maximální traťové rychlosti, která se pochopitelně v průběhu jízdy mění, jak ukazuje graf. Ve vybraných místech pak vlak brzdí do zastávky a po stanoveném časovém intervalu pro obsluhu se opět rozjíždí.

Modrou křivkou je znázorněna závislost odebíraného výkonu na čase. Největší příkon má tato souprava v době rozjíždění, kdy majoritní část spotřeby přebírá dodávaná energie pro urychlení. Příkon dosahuje až 1700kW. Příkon se při konstantní rychlosti mění a pohybuje se ve stovkách kW. Naopak při brzdění do zastávky je příkon záporný, vozidlo tedy rekuperuje a předává přebytečný výkon jiným vozidlům ve své blízkosti. To lze pozorovat například při stupňovitém brzdění do poslední stanice (Česká Lípa), rekuperovaný výkon dosahuje hodnot 1500 kW.

Příkladem nákladního vlaku může být souprava o hmotnosti 1000 tun, která na trati Děčín – Česká Lípa zastavuje ve stanicích Benešov nad Ploučnicí a Stružnice. Graf níže ukazuje stejné závislosti, jako v předchozím případě uvedeného osobního vlaku, a to závislost rychlosti na čase a příkonu na čase. V porovnání s osobním vlakem jde vidět výrazný rozdíl v příkonu, kdy nákladní vlak je silnější, má větší tažnou sílu a při zrychlování potřebuje daleko více energie. Zároveň je hodnota zrychlení nižší, a proto nákladní vlak není natolik dynamický oproti vlaku osobnímu. Z tohoto důvodu jeho trasa také trvá delší dobu.



Obrázek 8 Jízdní profil nákladního vlaku

4.2 Odpolední scénář

4.2.1 Jízdní řád

Jízdní řád v odpoledních hodinách je v příloze v příloze. Příklad odpoledního jízdního řádu ukazuje tabulka 12. Druhý dopravní scénář od patnácti do sedmnácti hodin je na počet vlaků ještě obsáhlejší. Na trati se jich za celý interval objeví 37.

V porovnání s ranním scénářem není žádná změna ve struktuře tabulky. Stejně tak u nákladních vlaků je systém popisu stejný.

vlak1	Os 6610	Jablonné v Podještědí	Benešov nad Ploučnicí	15:48	16:51
vlak2	Os 6661	Benešov nad Ploučnicí	Děčín-východ	15:03	15:14
vlak3	R 1350	Jablonné v Podještědí	Děčín-východ	15:07	16:06
vlak4	Os 6613	Františkov nad Ploučnicí	Jablonné v Podještědí	15:03	16:06
vlak5	Os 6625	Děčín-východ	Česká Lípa	15:24	16:02

Tabulka 12 Část vytvořeného jízdního řádu pro odpolední scénář

Stanovení množství nákladních vlaků a jejich hmotnost bylo určeno dle tabulky

Trat'	z GVD	Plán
Děčín-východ – Česká Lípa	1x1000t	1x1000t, 1x1500t
Česká Lípa – Bakov nad Jizerou	2x500t	4x500t
Bakov nad Jizerou – Mladá Boleslav	1x1000t	1x1500t
Mladá Boleslav – Nymburk	4x500t	1x500t, 4x1500t

Tabulka 13 Stanovení četnosti nákladních vlaků v odpoledním scénáři

4.2.2 Křižování vlaků

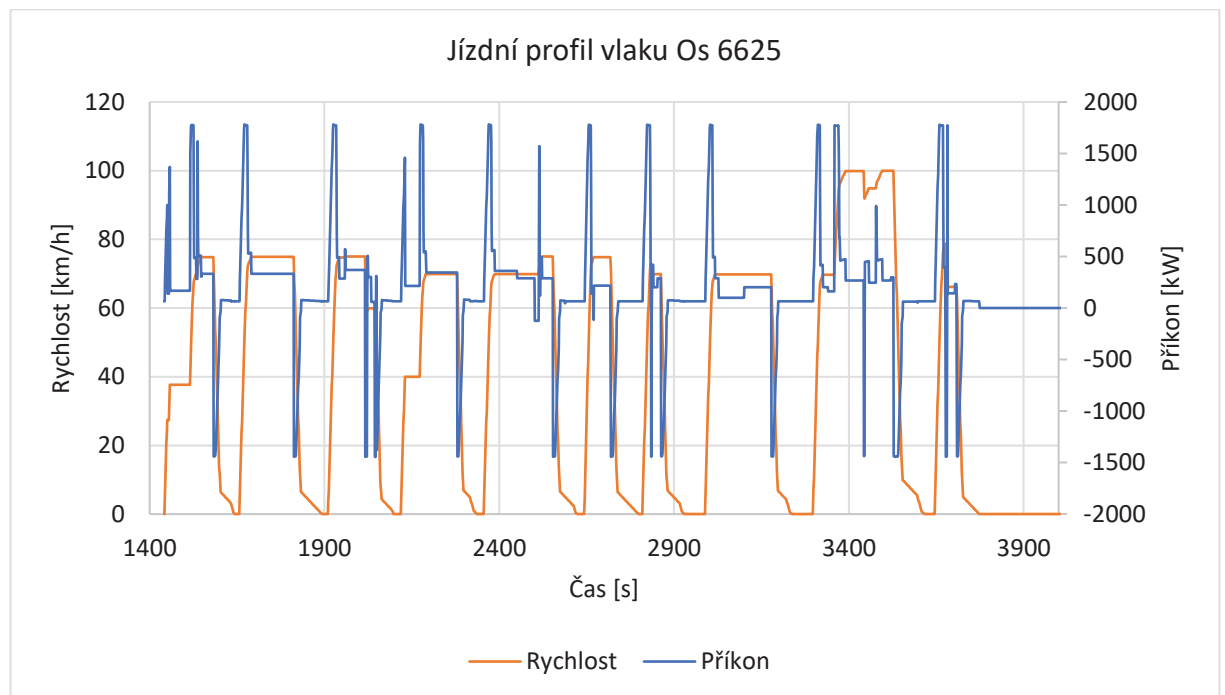
Pro křižování osobních vlaků byla vytvořena totožná tabulka jako v ranním scénáři.

Čachovice	16:36	OK	6051-vlak23	6052-vlak25
Česká Lípa	16:22	OK	1351-vlak9	6610-vlak1

Tabulka 14 Příklad křižení vlaků pro odpolední scénář

4.2.3 Příklad vymodelovaného vlaku

Příklad vlaku v odpoledním intervalu znázorňuje graf 9. V zadávacím formuláři se jedná o vlak 5, který vyjíždí v 15 hodin a 24 minut ze stanice Děčín, zastavuje ve všech zastávkách jako osobní vlak a do koncové stanice Česká Lípa přijede v čase 16:02.



Obrázek 9 Graf jízdního profilu vlaku Os 6625

5 Výpočet modelu

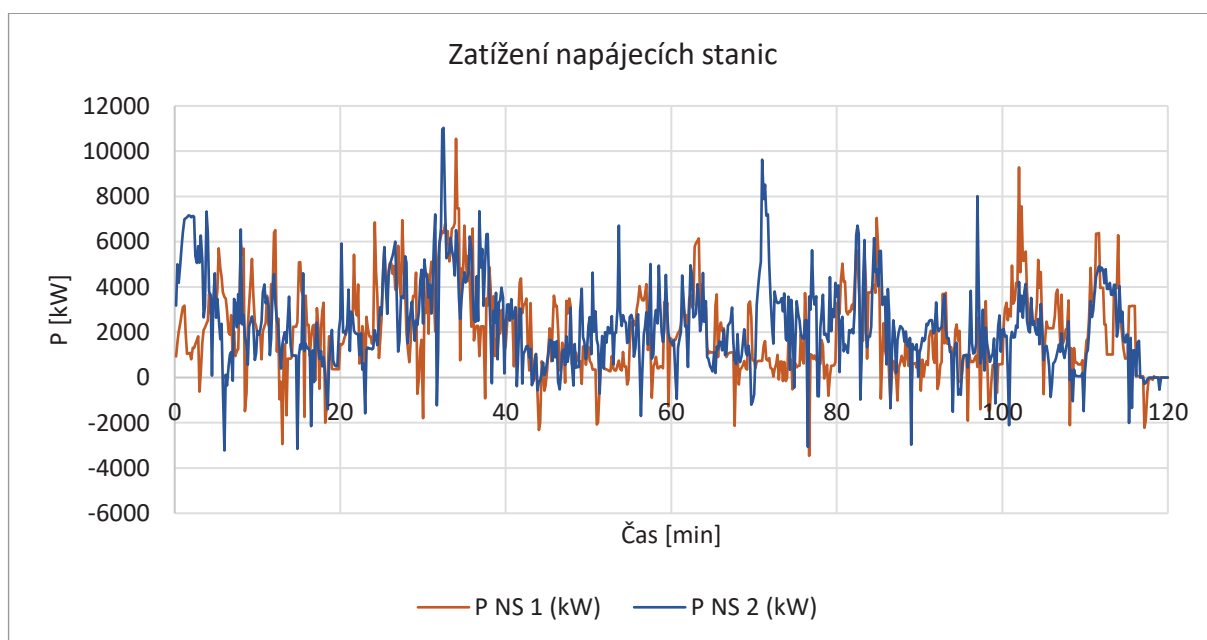
Postupným zadáváním vlaků do formuláře a laděním chyb v koordinaci s autorem výpočetního modelu bylo dosaženo prvních výsledků na výstupu z modelu. Nejprve byl modelován průběh s periodou 60 sekund, jehož doba simulace byla krátká a pro hledání chyb nejvhodnější. Model byl spouštěn ve verzi Matlabu R2019b.

Na zhodnocení závislostí pak byly modelovány obě dopravní situace s intervaly 10s, 5s a 1s v různých variantách. Nejdelší simulací byl odpolední scénář se sekundovým vzorkováním. Doba v tomto případě přesáhla 24 hodin. Nejprve se jednalo o navržené rozmístění měničové a transformátorové stanice. Pro tuto variantu byly modelovány i scénáře neuvažující rekuperaci. Na závěr byla provedena i simulace pouze měničových napájecích stanic.

6 Zhodnocení výstupů

6.1 Ranní scénář

Pro analýzu výsledků byl zvolen průběh se vzorkovací periodou 10s. První graf znázorňuje průběh zatížení napájecích stanic v čase. První napájecí stanice je konvenční transformátorová v Mladé Boleslavi. Druhá stanice pak měničová v České Lípě. Maximální zatížení stanice v České Lípě je cca 11 MW. V Mladé Boleslavi je maximum o něco méně, přibližně 10,5 MW. Jakékoliv hodnoty zatížení nad 8 MW jsou velmi krátkodobé a pouze po několik vzorků. Napájecí stanice zároveň rekuperuje, to se projeví záporný výkonem. V několika krátkých momentech rekuperovaný výkon dokonce přesahuje 3 MW. Špičkový celkový odebíraný výkon v pozorované oblasti oběma stanicemi dosahuje téměř 18 MW, v čase 7:32 (minuta 32,5), tj. stejný moment, kdy dosahuje maximum měničová napájecí stanice. V tuto dobu se na trati pohybuje devět vlaků, z nichž pět se rozjíždí. To je ještě umocněno tím, že všechny vlaky, které nabírají rychlost jsou nákladní, tzn. s vyšším příkonem. (vlaky 5,9,13,19,20,21,22,24,27). Vlak 5 brzdí do České Lípy, stejně tak vlak 9 zpomaluje před Bakovem nad Jizerou. Vlaky 13 a 19 se pohybují v úseku 1. Vlak 20 je nákladní a vyjíždí z Děčína. Vlak 21 nabírá rychlost v úseku 4, obdobně vlak 22 v úseku 3. Vlak 24 zrychluje uvnitř úseku 2. Poslední vlak 27 opouští stanici Nymburk.



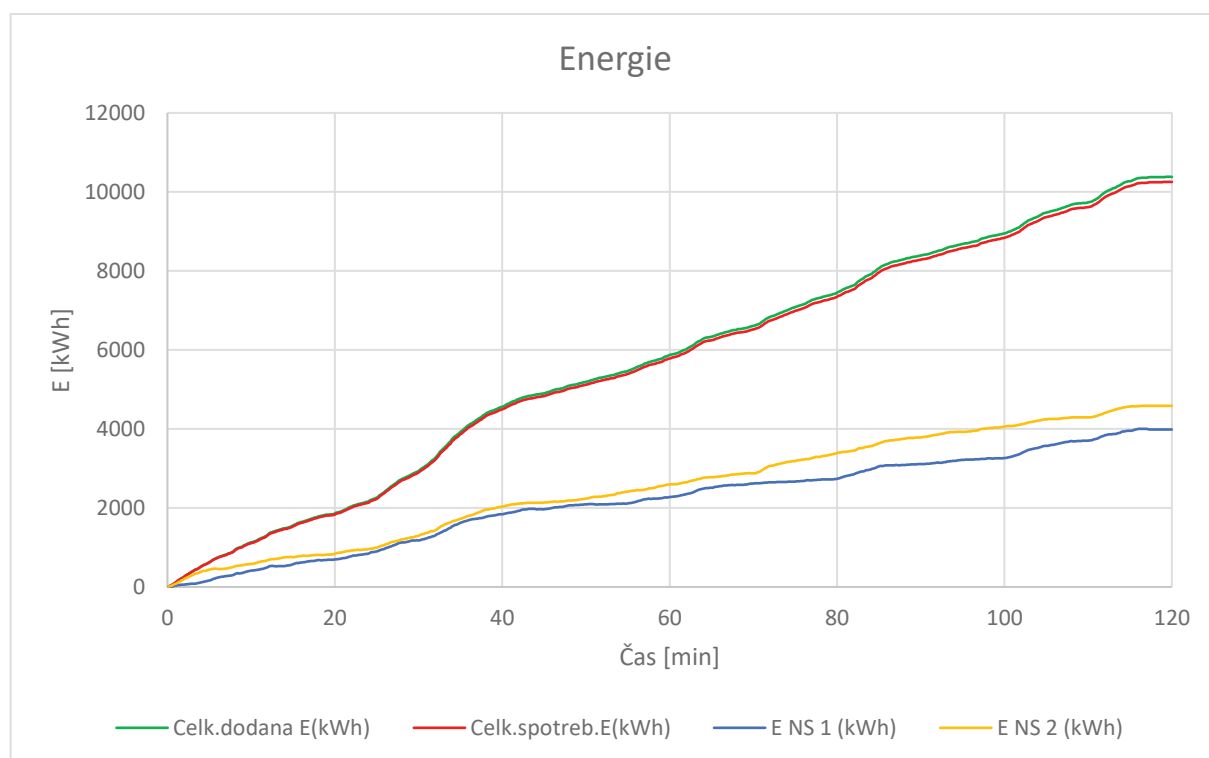
Obrázek 10 Zatížení napájecích stanic v ranním scénáři

Průběh odběru proudu se podobá zatížení, ovšem stejný není, protože napětí v troleji různě kolísá. Maximální dodávaný proud je srovnatelný u obou napájecích stanic a činí

přibližně 420 A. Střední hodnota proudu transformátorové napájecí stanice činí 83 A. U měničové napájecí stanice je to o něco více, 92 A.

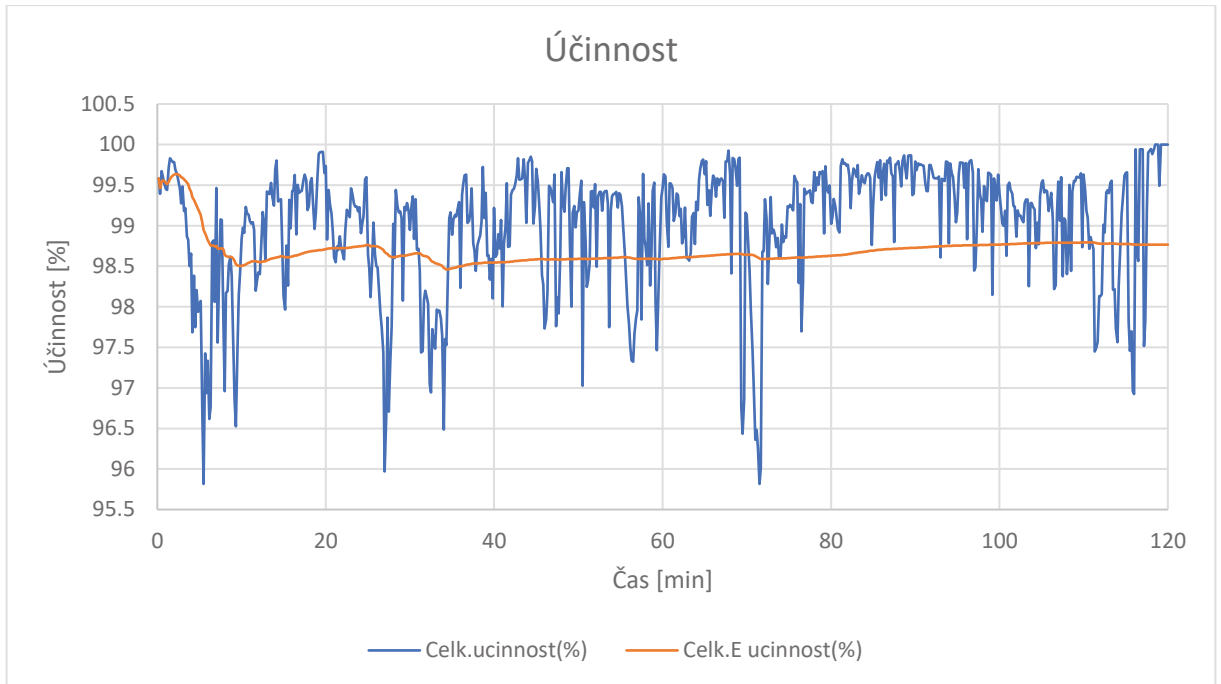
Obecně je průběh zatížení velmi proměnlivý s tím, jak se každým okamžikem mění spotřeba vlaků. Vlak z energetického modelu přejde do maximálního tahu během pár sekund. Výkyvy jsou způsobené současnými rozjezdy vlaků. Z tohoto důvodu byly vymodelovány totožné situace pouze s odlišným výpočetním intervalem.

Následující graf ukazuje spotřebovanou energii. Energetická náročnost traťových úseků je dobře rozložena mezi dvě napájecí stanice. Odebraná energie měničové napájecí stanice je v celkovém součtu o cca 15 % procent vyšší a pohybuje se kolem 4600 kWh. Energetické ztráty jsou rozdílem mezi celkovou spotřebovanou a celkovou dodanou energií (zelená a červená křivka). Rozdíl na konci intervalu činí 128 kWh. Ztrátám se rozumí úbytek energie na trakčním vedení. Celková spotřebovaná energie obou stanic překročila 10MWh za sledovaný dvouhodinový úsek na celé oblasti.



Obrázek 11 Spotřeba energií v ranním scénáři

Další graf znázorňuje účinnost napájení. Modrou křivkou se uvažuje momentální účinnost, která velmi kolísá. Několikrát za časový interval klesne pod 96 %. Na konci časového úseku, kdy jsou již všechny vlaky zastaveny, se okamžitá účinnost blíží 100 %, odběr a ztráty jsou minimální. Druhá křivka pak načrtává průběh celkové účinnosti za již uplynulý čas (vychází z energie, která je vypočítána integrací celkového výkonu na sledovaném intervalu – $E = \int_{t_1}^{t_2} P(t)dt$). O efektivitě celého systému pak vypovídá poslední vypočítaný vzorek celkové energetické účinnosti. Účinnost přenosu energie po trakčním vedení je 98,77 %.

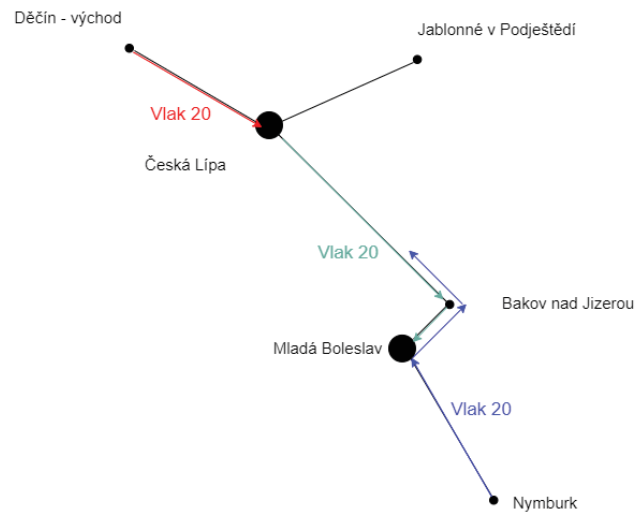


Obrázek 12 Účinnost v ranním scénáři

Další grafy přináší srovnání napětí na sběračích vlaků, přičemž první z vlaků se pohybuje v blízkosti měničové napájecí stanice. Druhý naopak na úseku blíže transformátorové stanici. Vlak 20 je nákladní, s hmotností 1000 tun, jedoucí z Děčína do České Lípy (měničové napájení), vlak 10 je rychlík jedoucí z Nymburka do Bělé pod Bezdězem (transformátorové napájení). Průběh napětí je zobrazen i v momentě, kdy jsou soupravy odstaveny. V tu chvíli pouze kopírují napětí uzlu, na kterém se nachází. Tato část grafu je vykreslena fialově. Až při znatelném oddálení od uzlu lze zaznamenat odlišné napětí. Doba pohybu vlaku v oblasti je zvýrazněna zeleně.

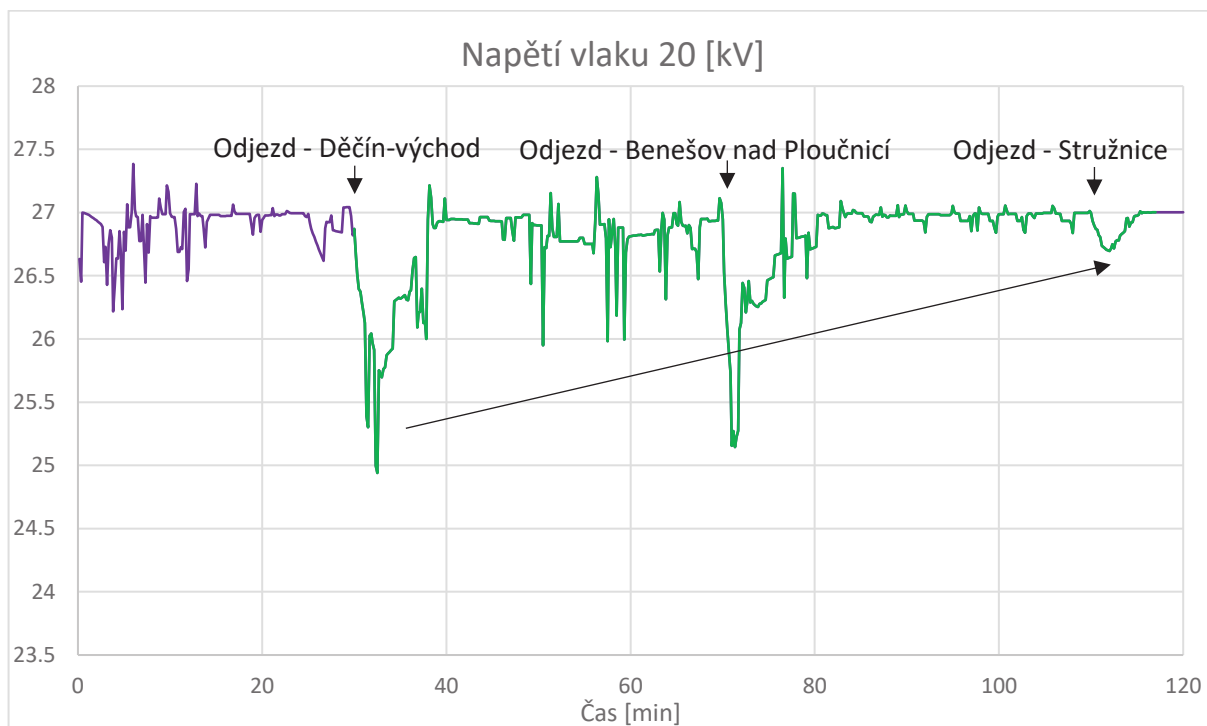
Na první pohled je vidět rozdíl v kolísání napěťové hladiny. Měničová stanice lépe udržuje stabilní napětí 27 kV. Díky říditelnosti polovodičových prvků lze dosáhnout tvrdšího napětí. Transformátorová stanice má nenulovou vnitřní reaktanci, a proto je výstupní napětí měkčí. Navzdory tomu nákladní vlak způsobí silnější propad napětí při svých rozjezdech, protože odebírá podstatně větší výkon. Úbytek napětí je způsoben impedancemi vedení. To je

patrné při rozjezdu vlaku 20 ve 30. minutě. Zelený průběh klesne až pod hladinu napětí 25 kV. Vlak se rozjíždí ve vzdálenosti 28 km od napájecí stanice, kde je úbytek nejvyšší.

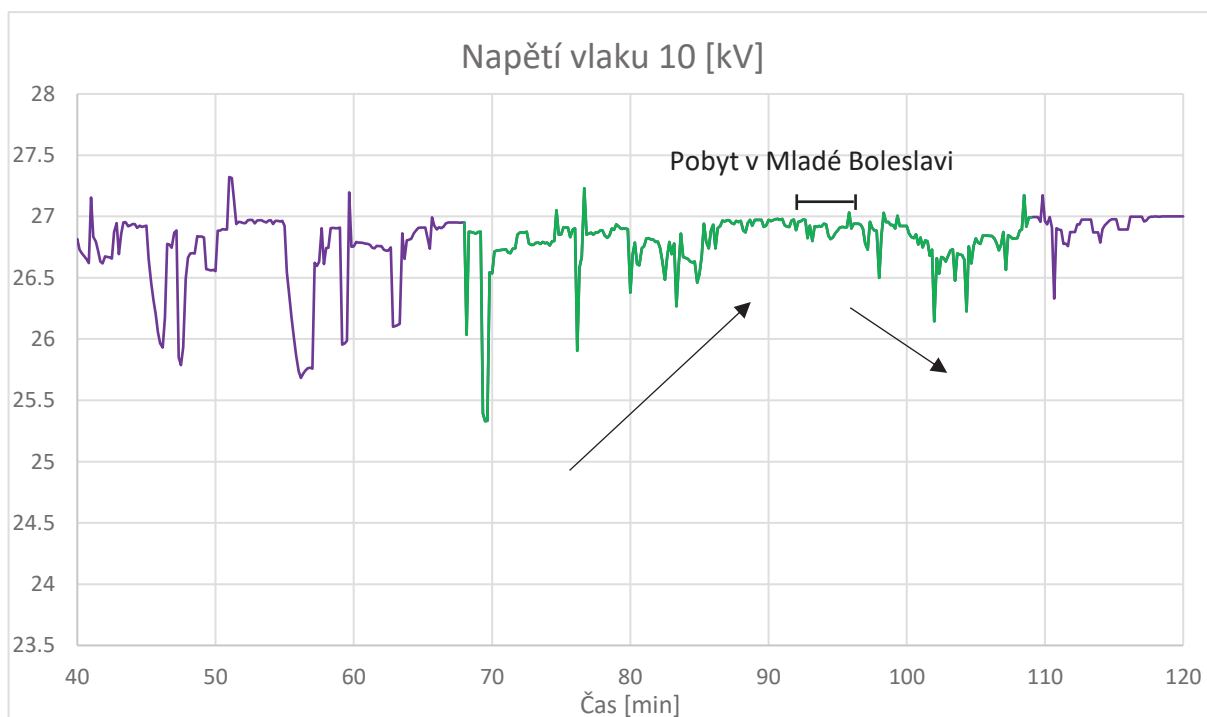


Obrázek 13 Ilustrační mapka pohybu vybraných vlaků v ranním scénáři

Stejné chování lze pozorovat u rychlíku. Vlak vyjíždí na jednostranně napájený úsek ve vzdálenosti 30 km od napájecí stanice a postupně se k ní přibližuje. Velké výkonové odběry při rozjezdech s kratší vzdáleností postupně působí nižší propady napětí na sběrači. To je ale zároveň také ovlivněno dalšími vlaky pohybujícími se v okolí a aktuálními jízdními odpory na trati. Kvůli tomu nelze pozorovat lineární závislost. Vlak 10 projíždí ve své trase přímo místem napájení. Do Mladé Boleslavi se dostává v čase 8:33 a je vidět, že se v tomto časovém intervalu stabilizuje napětí na sběrači. Po odjezdu se výkyvy opět prohlubují.



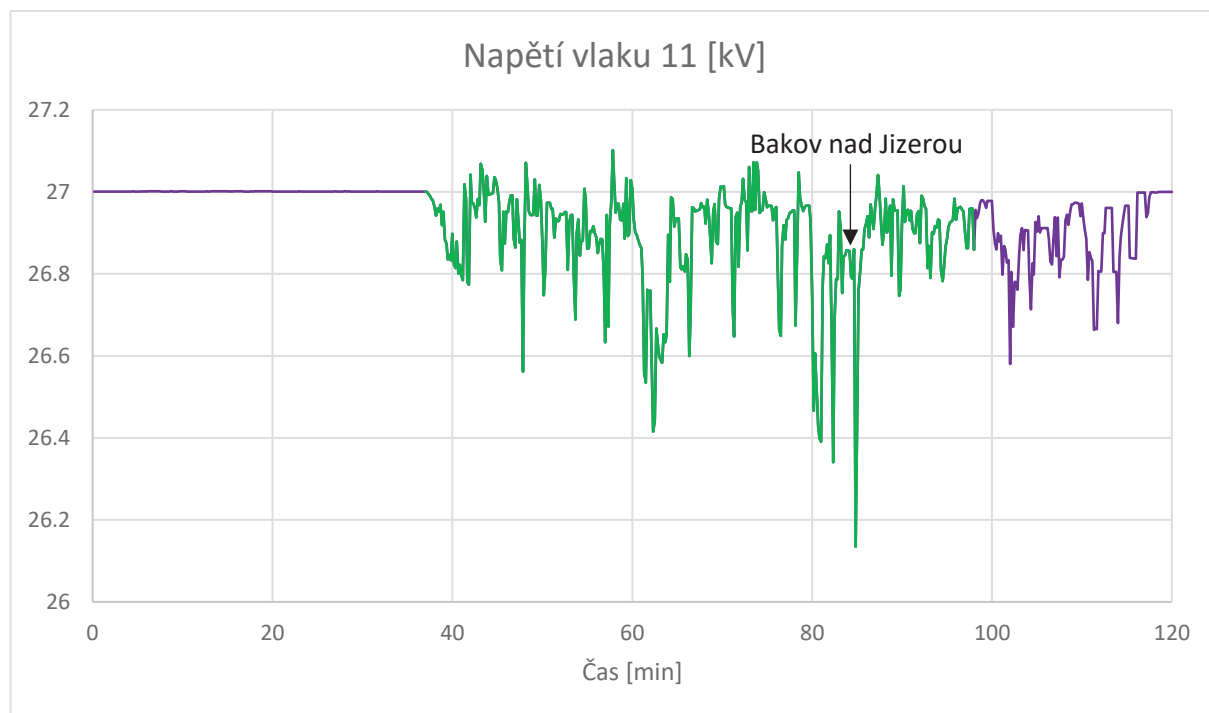
Obrázek 14 Průběh napětí na sběrači vlaku 20 v ranním scénáři



Obrázek 15 Průběh napětí na sběrači vlaku 10 v ranním scénáři

Pro porovnání je přiložen graf 16, na kterém je vidět průběh napětí dalšího vlaku - 11, který jede z České Lípy do Mladé Boleslavi. Vlak se pohybuje v oboustranně napájeném úseku, přičemž vzdálenost napájecích stanic od sebe je celkem 54 km, což je téměř dvojnásobek délky jednostranných úseků projížděných vlaky 20 a 10.

Jedná se o osobní vlak, který zastavuje i v zastávkách. Na průběhu napětí je patrný zvyšující se úbytek se vzdalováním se od napájecí stanice, jako v přechozích případech. Za povšimnutí ovšem stojí úroveň, na kterou klesá napětí. Oproti jednostrannému napájení, kde se napětí běžně dostalo pod 26kV (především u transformátorové napájecí stanice), zde nedochází k poklesu ani pod 26kV. Nejvyšší pokles napětí na sběrači se objevil při rozjezdu z Bakova nad Jizerou, který je blíže právě transformátorové stanici. Na tento propad mají ovšem vliv také další vlaky v oblasti.



Obrázek 16 Průběh napětí na sběrači vlaku 11 v ranním scénáři

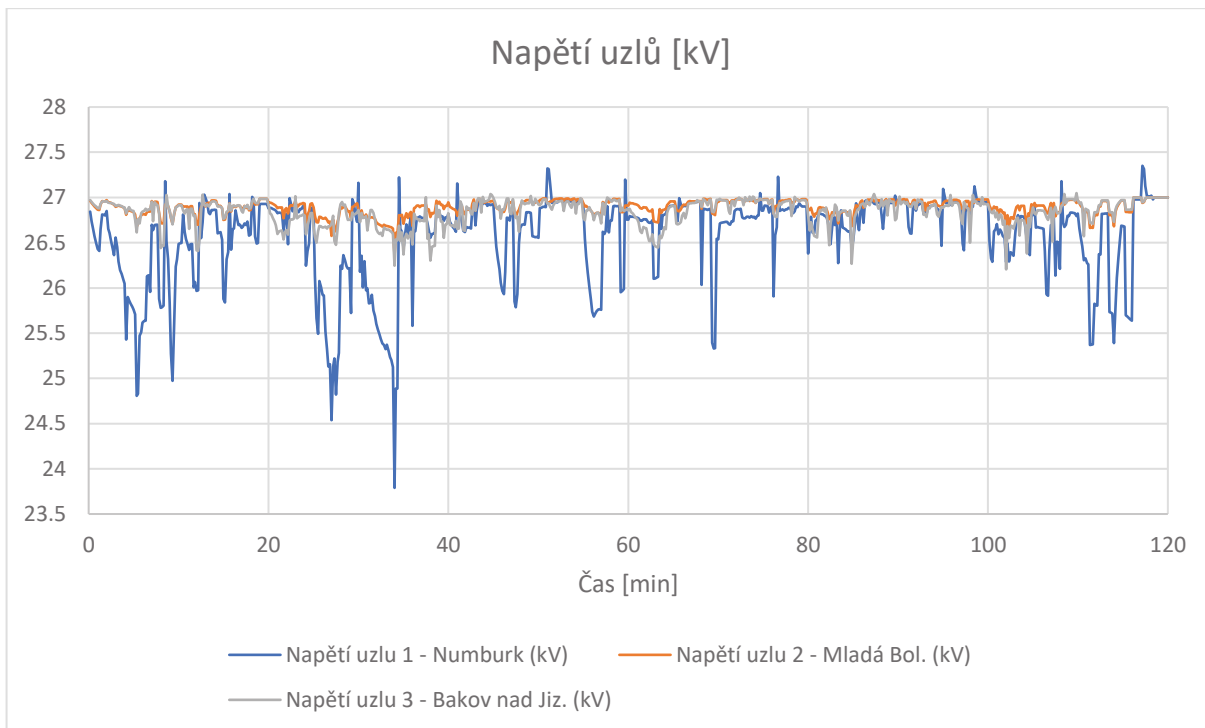
Poslední dva grafy týkající se ranního scénáře vykreslují průběhy napětí všech uzlů na sledované oblasti. Největší poklesy napětí jsou ve stanici Nymburk (uzel 1). Napětí uzlu 4 opět potvrzuje výhodu měničové stanice, která si v místě napájení drží konstantní napětí 27 kV. Uzel 2, ve kterém se nachází transformátorová napájecí stanice naproti tomu klesá s úrovní napětí až na 26,36 kV. Napětí uzlu 3 se od uzlu 2 příliš neliší vzhledem ke krátké vzdálenosti od sebe (pouhých 9 km).

V tabulce 15 jsou srovnány střední hodnoty a minima napětí jednotlivých uzlů. Tyto údaje vypovídají o rozložení zatížení ve vztahu se vzdáleností od napájecí stanice. Nejnižší napětí se objeví na uzlu 1 a činí 23,79 kV. První úsek je nejdelší a k tomu napájený jednostranně transformátorovou stanicí. Výrazné minimum i nejnižší střední hodnota oproti ostatním uzlům je dle očekávání. Uzly 5 a 6 jsou konečné uzly pro stejně dlouhé úseky 4 a 5. Střední hodnota

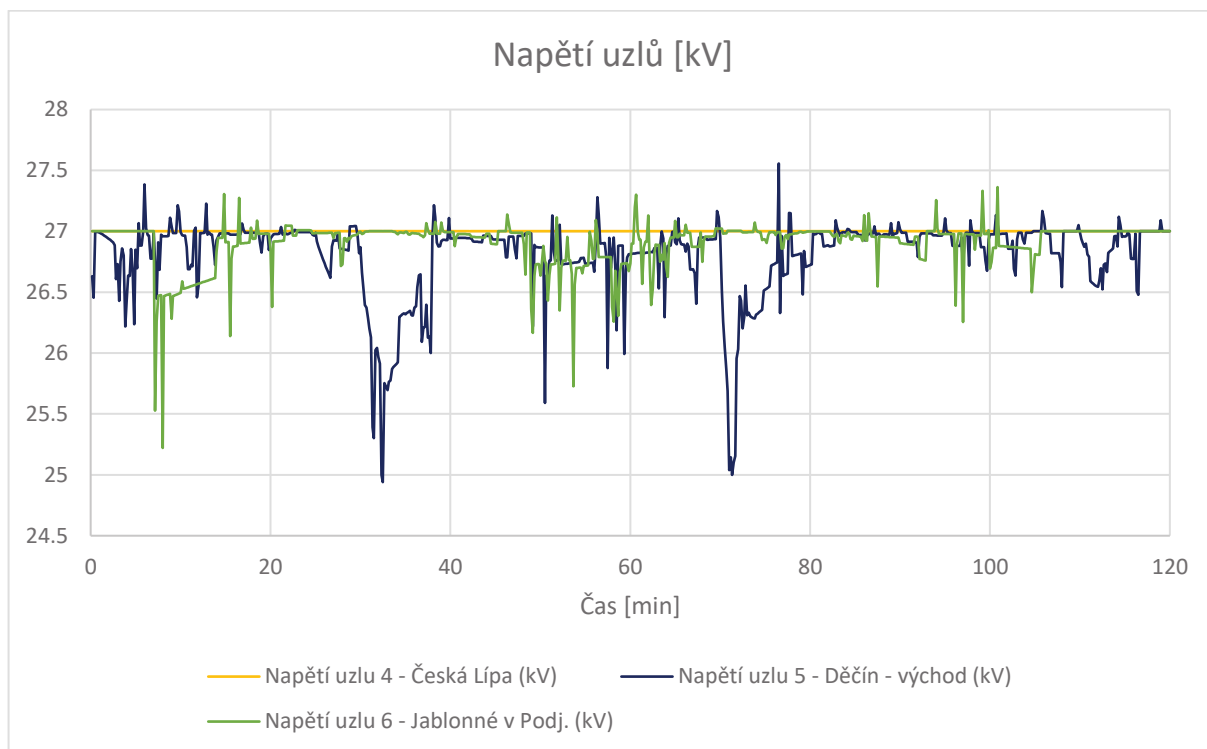
napětí uzlu 5 je nižší, z toho lze vyvodit, že úsek je více zatížený. Na trase Děčín – Česká Lípa je vyšší odběr energie.

	Napětí uzlu 1 (kV)	Napětí uzlu 2 (kV)	Napětí uzlu 3 (kV)	Napětí uzlu 4 (kV)	Napětí uzlu 5 (kV)	Napětí uzlu 6 (kV)
Min	23.79	26.36	26.20	27.00	24.94	25.22
Střední	26.58	26.89	26.84	27.00	26.81	26.91

Tabulka 15 Minima a střední hodnoty napětí uzlů v ranním scénáři



Obrázek 17 Napětí uzlů 1-3 v ranním scénáři



Obrázek 18 Napětí uzlů 4-6 v ranním scénáři

V dalším kroku byly provedeny simulace scénáře s rozdílným intervalem výpočtu za účelem zjištění míry nepřesnosti při hrubším vzorkování. Byly zvoleny periody vzorkování 5s a 1s. Pokud by byl rozdíl zanedbatelný, dal by se tímto způsobem ušetřit výpočetní čas při modelování složitějších struktur s ještě více vozidly než v nyníjších scénářích.

Nejprve byly porovnávány střední hodnoty vybraných vypočítaných veličin, které jsou shrnuty v tabulce 16. Jako nejpřesnější údaj se považuje vždy výsledek se vzorkovací periodou 1s. U odebraných výkonů je rozdíl v rámci jednotek až nižších desítek kW, což v poměru netvoří odchylku vyšší než 1 %. Rozdíl středních hodnot odebraných proudů se pohybuje v desetínách A. Porovnáním průběhu s periodou 10s je odchylka vždy záporná, na rozdíl od 5s simulace, která vyšla obráceně a její hodnoty se buď shodují, nebo je odchylka kladná. Shodné údaje se objevují u zatížení napájecí stanice 2.

Nejvyšší odchylka byla zjištěna u střední hodnoty celkových ztrát, která je v obou případech kladná a v porovnání s 5s průběhem se pohybuje těsně pod hranicí jednoho procenta.

Perioda (s)	P NS 1 (kW)	Proud NS 1 (A)	P NS 2 (kW)	Proud NS 2 (A)	Celk.ztraty(kW)
10	1993.36	83.49	2291.07	92.01	64.03
5	2010.50	83.93	2306.36	92.35	64.31
1	2008.77	83.64	2306.36	92.36	63.69
Odchylka vůči průběhu 1s (%)					
10	-0.768	-0.173	-0.663	-0.369	0.545
5	0.086	0.353	0.000	0.000	0.981

Tabulka 16 Střední hodnoty a jejich odchylky v ranním scénáři

Následující tabulka porovnává energie a jejich rozdíly v simulacích. Odchytky odebíraných výkonů a energií se dle očekávání shodují s přechozí tabulkou. Stejně tak celkové energetické ztráty. Při bližším pozorování lze provést jednoduchou kontrolu ověření správnosti výsledkových dat z modelu. Délka modelovaného intervalu jsou 2 hodiny. Přepočet ze středního výkonu napájecí stanice 1 na energii: $E [kWh] = \frac{2008,77 \cdot 7200}{3600} = 4017,54 kWh$

Rozdíly mezi účinnostmi za celý interval (hodnoty odečtené z posledních vzorků výpočtu) nabývají tisícín procenta.

Perioda (s)	E NS 1 (kWh)	E NS 2 (kWh)	Celk.E účinnost(%)	Celk.ztrát.E(kWh)
10	3986.71	4582.14	98.77	128.07
5	4021.00	4612.72	98.76	128.62
1	4017.55	4612.71	98.77	127.37
Odchylka vůči průběhu 1s (%)				
10	-0.768	-0.663	-0.007	0.545
5	0.086	0.000	-0.009	0.981

Tabulka 17 Energie a jejich odchytky v ranním scénáři

Jako další porovnání mezi rozdílnými simulace se nabízí ověřit již jednotlivé konkrétní vypočítané vzorky. Pro tento účel poslouží první, druhá a třetí maximální hodnota výkonu a proudu u obou stanic. Z tabulky 18 je patrné, že v tomto případě se už hodnoty výrazně liší.

X-tá nejvyšší hodnota	Perioda (s)	P NS 1 (kW)	Proud NS 1 (A)	P NS 2 (kW)	Proud NS 2 (A)
1	10	10550.86	416.0409	11032.1	416.1134
	5	10550.86	416.0409	11181.4	421.6575
	1	10730.57	423.1823	11181.4	421.6575
2	10	9291.36	357.0265	10967.65	413.3354
	5	10080.88	397.2992	11032.1	416.1134
	1	10642.16	419.6751	11167.19	421.1092
3	10	7555.206	289.7816	9619.621	364.8312
	5	7893.721	306.7362	10967.65	413.3354
	1	10550.86	416.0409	11154.7	420.6241
Odchylka (%)					
1	10	-1.67	-1.69	-1.34	-1.31
	5	-1.67	-1.69	0.00	0.00
2	10	-12.69	-14.93	-1.79	-1.85
	5	-5.27	-5.33	-1.21	-1.19
3	10	-28.39	-30.35	-13.76	-13.26
	5	-25.18	-26.27	-1.68	-1.73

Tabulka 18 Maximální navzorkované hodnoty a jejich odchytky v ranním scénáři

Už první maximální hodnoty ukazují, že při hrubším výpočtu výkonové špičky unikají a hodnoty mohou být zkreslené. Například u napájecí stanice 1 je zaznamenán nižší výkon o

cca 1,68 %. U napájecí stanice 2 není odchylka tak velká, 1,33 % a maximální hodnoty vzorkování 5s a 1s se shodují. Druhé a třetí nejvyšší hodnoty se pak vzájemně liší daleko více. Lze zaznamenat, jak velký skok odebíraného výkonu jednotlivé po sobě jdoucí výkony mají, přičemž u dobře propočítané simulace výkon klesá po nízkých stovkách kW/vzorek, u hrubší periody výpočtu jsou skoky až v řádech tisíců kW, což jasně ilustruje tabulka. Například odchylka proudu první napájecí stanice třetí maximální hodnoty činí až 30 %. Může se tak stát, že budou odečtena data ze dvou výkonových špiček uvnitř intervalu. U periody 1s je to méně pravděpodobné a spíše se bude jednat o čísla v rámci jediné výkonové špičky.

Hodnoty u hrubšího vzorkování je proto nutné brát s rezervou, a i absolutně maximální údaj může být odlišný. Proto pokud je záměrem simulace zjistit špičkový výkon, či jinou okamžitou hodnotu, měl by model pracovat co nejpřesněji, se sekundovou výpočetní periodou. Naopak pro určení středních hodnot a energií je možné použít i větší vzorkovací interval, který přesnost zkreslí jen málo. Dojde tak k ušetření výpočetního času.

Posledním způsobem porovnání vlivu vzorkovací periody je sledování minim napětí na sběrači vybraných vlaků. Byly zvoleny již rozebírané vlaky 10, 11 a 20. Opět se jedná o okamžitou hodnotu. Napětí na sběračích evidentně nekolísá tak výraznými skoky, jako můžeme pozorovat u výkonů. Vypočtené minimální hodnoty napříč simulacemi jsou občas naprosto totožné. Nejvyšší odchylka dosahuje dvou desetín procenta u vlaku pohybujícího se po oboustranně napájeném úseku. U zbylých dvou souprav jedoucích na jednostranném úseku odchylka nepřekročí ani desetinu procenta. Rozdíl mezi různým vzorkováním je tak zanedbatelný.

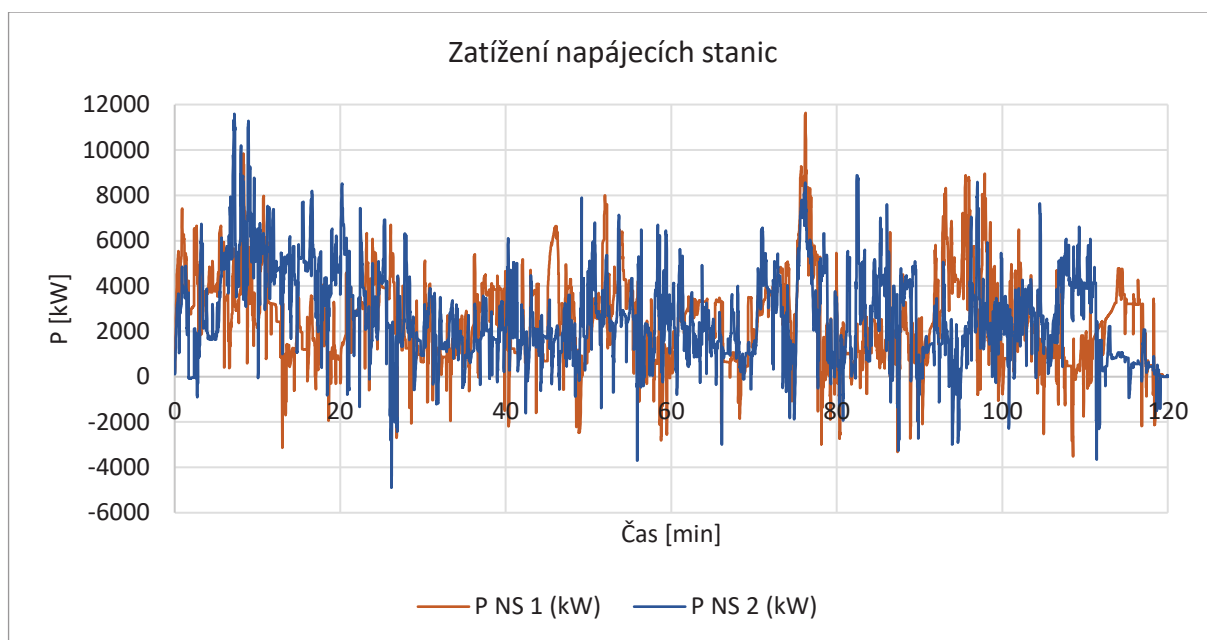
Perioda (s)	Napětí vlaku 10 (kV)	Napětí vlaku 11 (kV)	Napětí vlaku 20 (kV)
10	23.789	26.135	24.940
5	23.789	26.135	24.916
1	23.776	26.083	24.916
	Odchylka vůči průběhu 1s (%)		
10	0.055	0.198	0.099
5	0.055	0.198	0.000

Tabulka 19 Minima napětí na sběračích vybraných vlaků a jejich odchylky v ranním scénáři

6.2 Odpolední scénář

Odpolední scénář se oproti rannímu liší v počtu vlaků a jejich skladbou. Na trati se pohybuje o sedm vlaků více, přičemž jeden z nich je vlak nákladní, ostatní vlaky navíc jsou s cestujícími. Lze tedy očekávat vyšší nároky na napájecí stanice. Simulace byla časově náročnější. Vzhledem k důkazu výrazných změn konkrétních vzorků při jemnější periodě

výpočtů bude analýza výsledků vycházet již z výpočtů modelu se vzorkovací periodou o délce 1 sekunda.

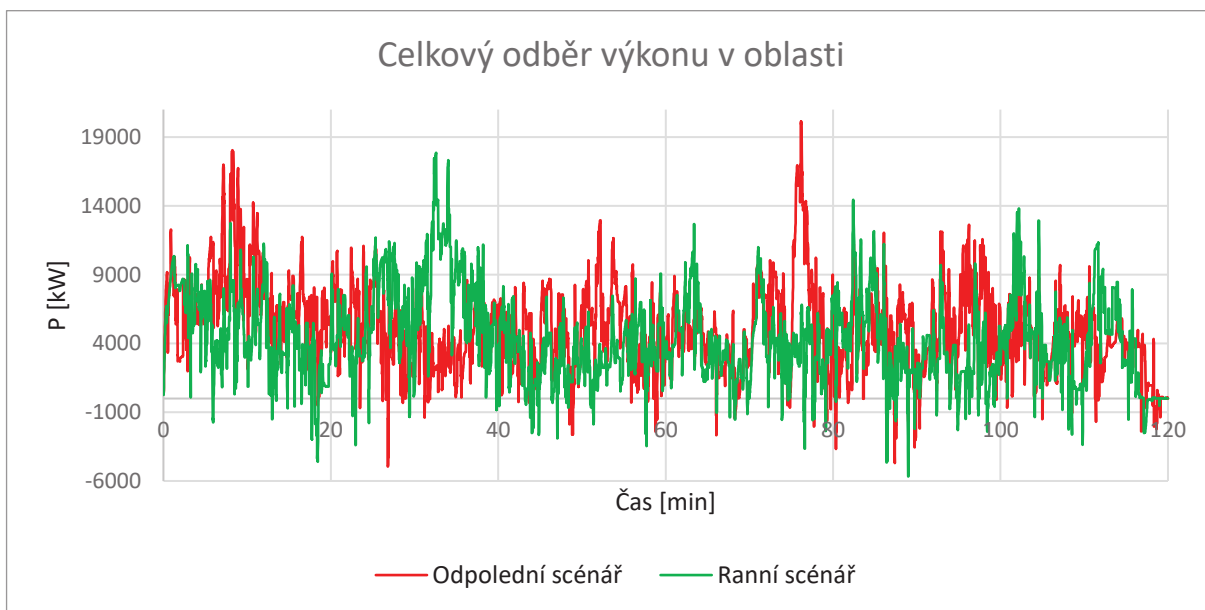


Obrázek 19 Zatížení napájecích stanic v odpoledním scénáři

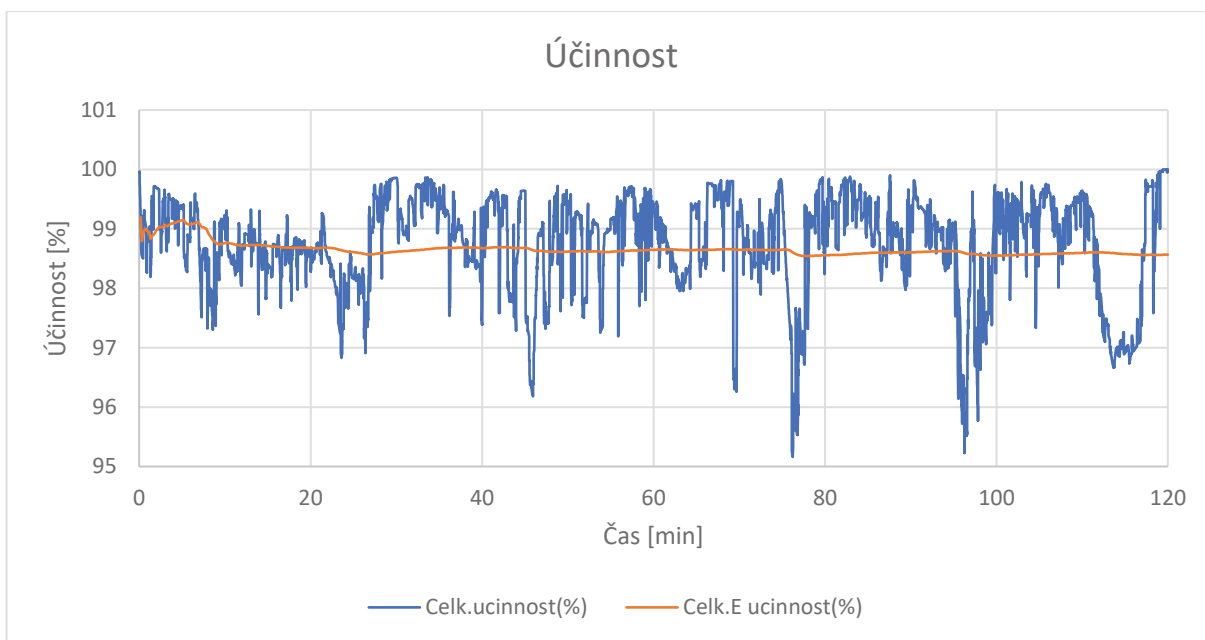
Na prvním grafu je opět zatížení napájecích stanic. Výkon v čase je rozložen jinak. Potvrdilo se, že špičkové výkony jsou díky vyššímu počtu vlaků vyšší. Například hodnota 8MW na stanicích byla překonána častěji než v předchozím případě. Absolutní maximum výkonu jedné napájecí stanice je vyšší o cca 500kW a činí 11,5 MW. Maximální rekuperovaný výkon je cca 3MW a tedy podobný jako v ranním scénáři.

Při sečtení obou napájecích stanic dosahuje maximální výkon až 20 MW. V tento moment, 76. minuta 10. sekunda, se na trati pohybuje jedenáct vlaků. Vlak 1 odebírá energii poblíž České Lípy. Vlak 10 jede v úseku číslo 3 mezi Českou Lípou a Bakovem nad Jizerou. Vlak 13 zrychluje za Nymburkem. Vlak 14 si udržuje konstantní rychlost při cestě do Bakova nad Jizerou. Osobní vlak 23 jede směrem od Mladé Boleslavi. Vlakem 26 začínají nákladní soupravy, tato souprava zrovna zrychluje ze zastávky Stružnice, kde vyčkávala na křížení s jinými spoji. Vlak 30 lehce rekuperuje při zvyšující se rychlosti, lze očekávat že jede z kopce dolů. Vlak 31 zrychluje při odjezdu ze stanice Stružnice. Těžké nákladní vlaky 32 a 34 (1500t) zrychlují v blízkosti mladoboleslavské napájecí stanice na úsecích 1 a 2. Poslední vlak 33 zrychluje z výhybny Straky.

Následující graf nabízí porovnání celkového odběru ranního a odpoledního scénáře. Oproti průběhům každé napájecí stanice zvláště si lze povšimnout, že výkyvů do rekuperovaných výkonů v součtu ubylo.



Obrázek 20 Porovnání celkového odebíraného výkonu u obou scénářů

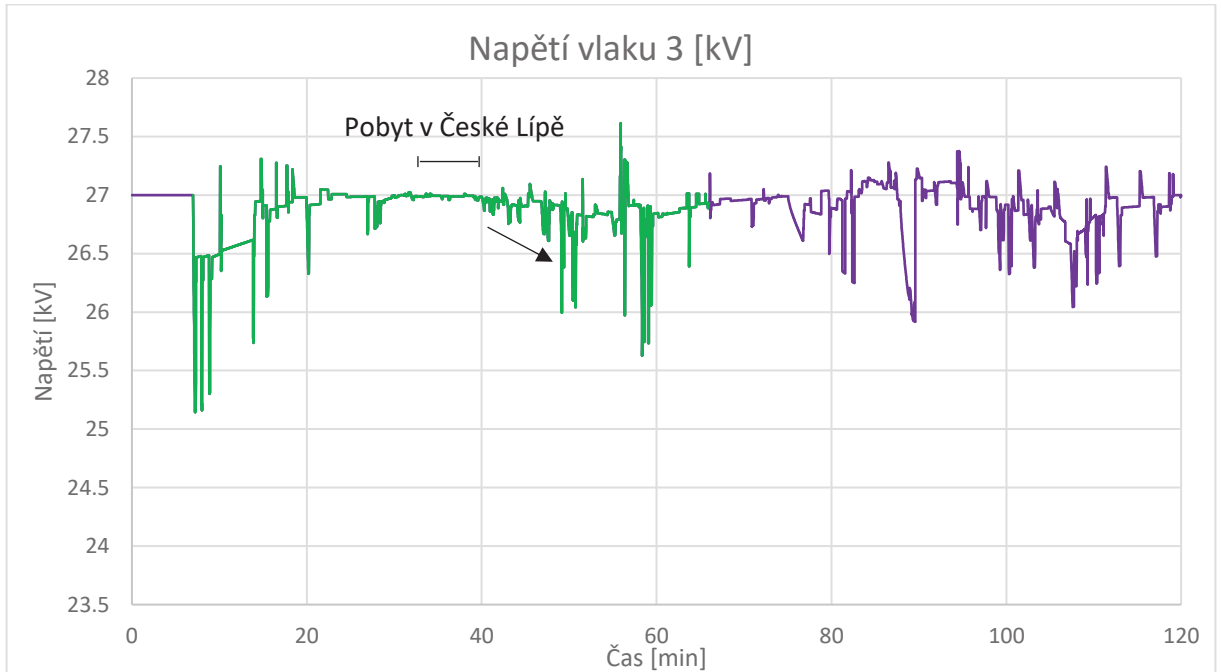


Obrázek 21 Účinnost v odpoledním scénáři

Další graf 21 ukazuje průběh okamžité účinnosti a celkové účinnosti. V porovnání s předchozím scénářem je výraznější propad okamžité účinnosti až na 95,2 % oproti 95,8 %. Nejníže je účinnost v momentě nejvyšší výkonové špičky zatížení. Větší zatížení napájecích stanic snižuje jejich účinnost, celková účinnost je nižší o dvě desetiny. Nemusí to být pravidlem, záleží na poloze jedoucích vlaků vůči napájecím stanicím.

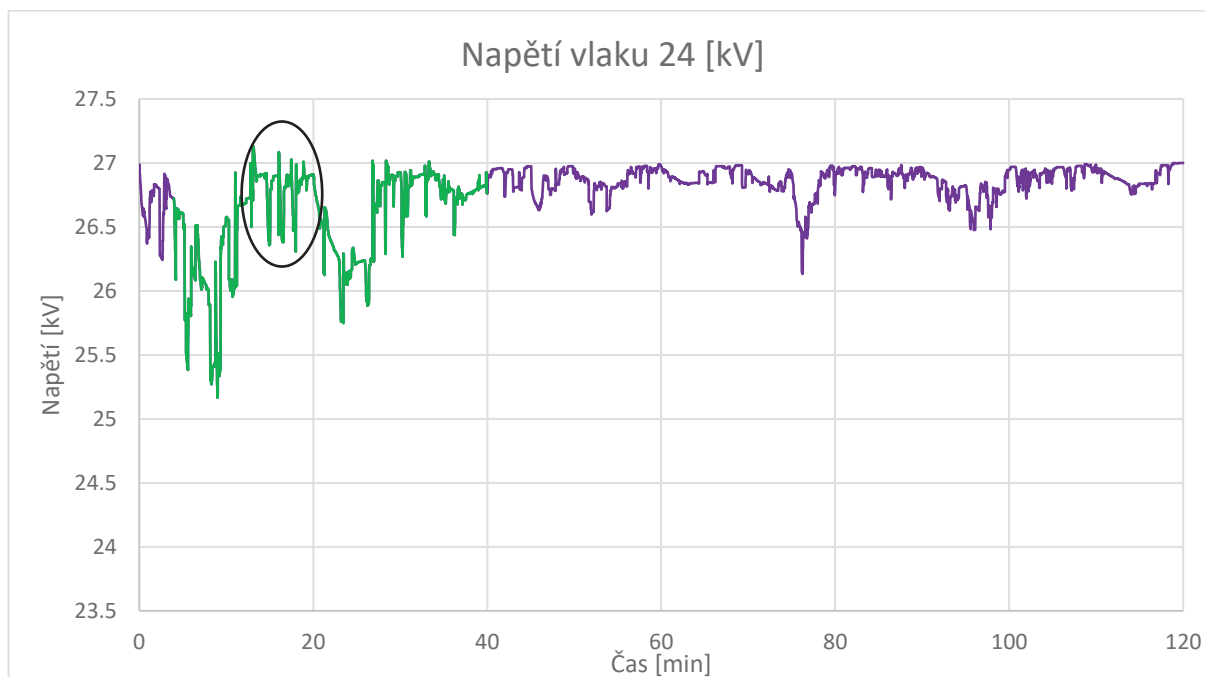
I v případě analýzy odpoledního scénáře byly vybrány konkrétní vlaky a posuzováno napětí na jejich sběračích. Zvoleny byly vlaky 3, 24 a 37. Vlak 3 je rychlík, který jede z Dčína do Jablonného v Podještědí. Ukazuje průjezd dvou jednostranně napájených úseků s napájecí

stanicí v místě styku těchto úseků. Na grafu je zcela zřejmé, jak se výkyvy napětí s přibližující se napájecí stanicí zmenšují. To je navíc umocněno měničovou napájecí stanicí, která má stabilnější charakter. Vlak do České Lípy přijede v čase 15:33 a zůstává zde 7 minut. Po odjezdu lze pozorovat opět zvyšující se výkyvy napětí při odběru.



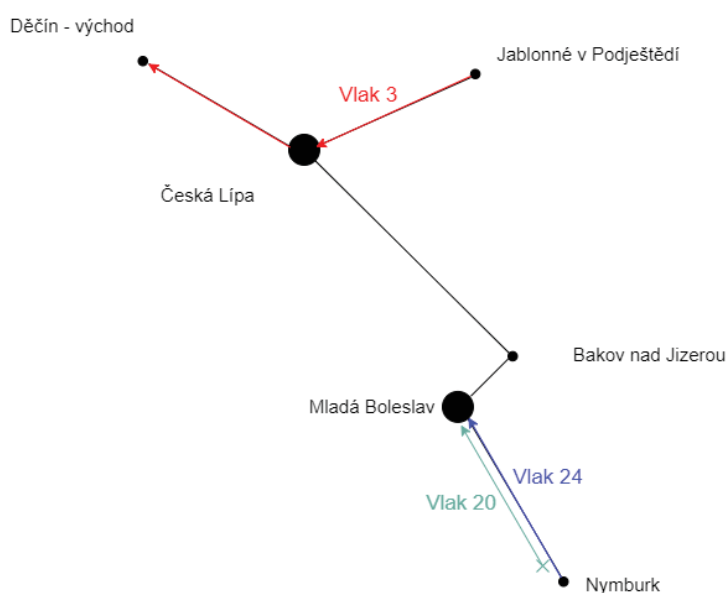
Obrázek 22 Průběh napětí na sběrači vlaku 3 v odpoledním scénáři

Vlak 24 je osobní, jedoucí z Nymburka do Mladé Boleslavi. Pojízdný úsek lze také považovat za jednostranně napájený. Napájecí stanice je v Mladé Boleslavi. Souprava svojí povahou osobního vlaku zastavuje velmi často. Výrazné poklesy napětí při jízdě, které jsou k vidění na grafu 23, jsou povětšinou způsobeny jinými soupravami na trati (např. ve 20. minutě je zřejmé působení odběru nákladního vlaku 37 popsaného dále). Vliv sledovaného vlaku je možné zaznamenat na krátkém intervalu od 13. do 20. minuty, kde vlak nejprve rekuperuje při zastavování a následně jsou vidět i rozjezdy ze zastávek (minuta 15 a 20) Rozjezd v čase 15:16 (prostřední ze třech „zubů“) patří vlaku 22.



Obrázek 23 Průběh napětí na sběrači vlaku 24 v odpoledním scénáři

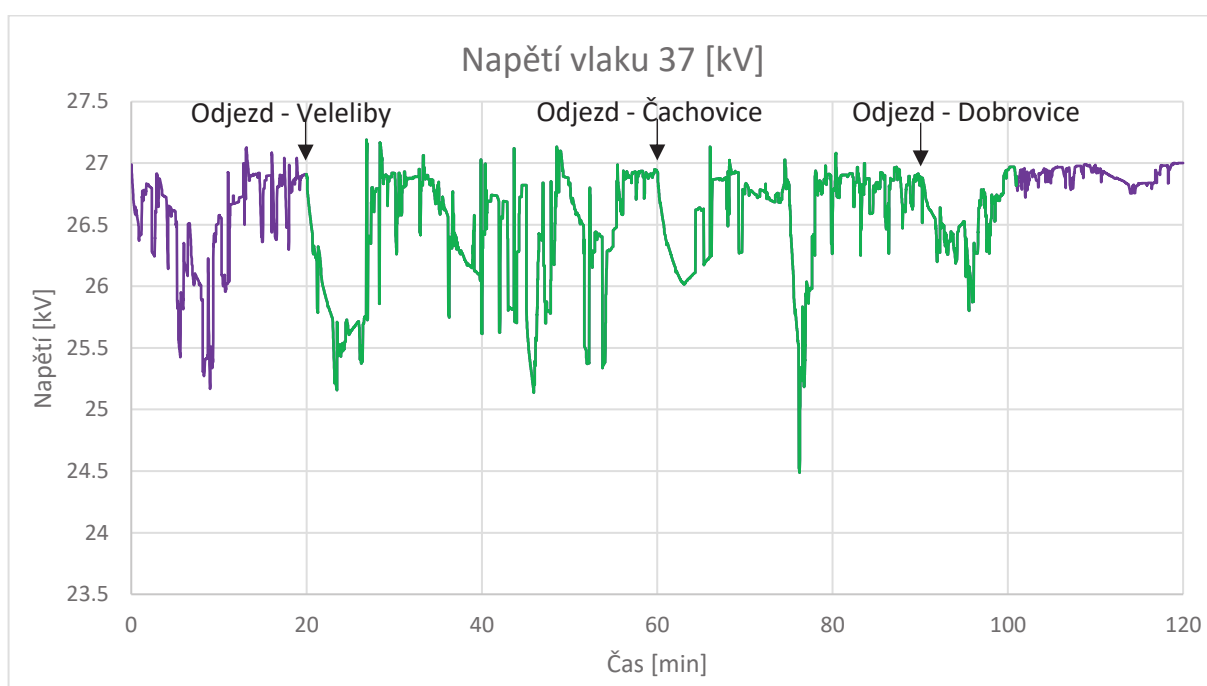
Poslední vlak je 37 a jedná se o nákladní soupravu jedoucí z Velelib do Mladé Boleslavi. Vlak zastavuje dvakrát (jízdní řád v příloze), a to v Čachovicích a Dobrovicích. Hmotnost soupravy činí 1500 tun. Vlak jede po stejné trati jako předchozí vlak 24 a tedy z hlediska napájení jde o jednostranný úsek se směrem jízdy k napájecí stanici. Tento graf ukazuje, že přibližující se napájecí stanice nemusí být průběhy napětí na první pohled zřejmá, nicméně po rozboru jde vliv kratší vzdálenosti vidět.



Obrázek 24 Ilustrační mapka pohybu vybraných vlaků v odpoledním scénáři

Vlak se rozjíždí v čase 15:20 (20. minuta). Na grafu lze tento prvotní rozjezd dobře zaznamenat. Napětí poklesne až na 25,2 kV v minutě 23,3 a drží se na nízké úrovni až do minuty

26, kdy přestal nákladní vlak zrychlovat. Naopak krátce za tímto propadem se na chvíli objeví i rekuperace při brzdění do Čachovic, když napětí sběrače překročí 27 kV. V následující půlhodině vlak pouze kopíruje napětí v místě svého zastavení. Z Čachovic a okolí v tomto intervalu odjede několik vlaků, které způsobí poklesy napětí na sběrači. Druhý rozjezd je přesně v 16:00 (60.minuta). I zde lze vidět pokles napětí, ale nyní pouze na 26 kV. Vlak v žádném rozjezdu nestihne zrychlit nad 95 km/h. Poslední zrychlování je pak z Dobrovice v čase 16:30 (90.minuta). Napětí poklesne na 26,2 kV. Poté klesne ještě o něco níže, nicméně to je dáno souběžným rozjezdem vlaku 36, který od minuty 95 (16:35) odjíždí z Nymburka, což je koncová stanice jednostranně napájeného úseku a způsobí tak pokles i na sledovaném vlaku 37. Situace je zřejmá na grafu 25.



Obrázek 25 Průběh napětí na sběrači vlaku 37 v odpoledním scénáři

Detailní minimální a střední hodnoty napětí na sběračích všech zkoumaných vlaků po dobu jízdy ukazuje tabulka 20.

	Napětí vlaku 3 (kV)	Napětí vlaku 24 (kV)	Napětí vlaku 37 (kV)
Min	25.143	25.168	24.486
Střední	26.854	26.563	26.494

Tabulka 20 Minima napětí na sběračích vybraných vlaků v odpoledním scénáři

Stejně jako v ranním scénáři byla data shrnuta do středních hodnot. Porovnání vzorkovacích period již bylo popsáno a u odpoledního scénáře odchylky nabývají podobných a řádově stejných hodnot.

Dále byly vypočtené a okamžité hodnoty porovnány mezi scénáři. Ranní scénář uvažuje 30 vlaků, odpolední 37. Jedná se tedy o cca 20 % nárůst. Přičemž nárůst nákladních vlaků je o cca 10 % a osobních o cca 30 %.

V tabulce níže je patrný rozdíl středního zatížení napájecích stanic mezi oběma situacemi. Napájecí stanice 1 jedna vykazuje výraznější procentuální nárůst odebraného výkonu. To vypovídá o změně rozložení vlaků po oblasti. V ranním scénáři byla zatížena měničová napájecí stanice více o cca 15 %. Odpolední scénář tento rozdíl umazal na 7 %. Porovnání všech uváděných hodnot v následujících tabulkách byla provedena na průběžích se vzorkovací periodou 1s pro vyšší přesnost.

Scénář	P NS 1 (kW)	Proud NS 1 (A)	P NS 2 (kW)	Proud NS 2 (A)	Celk.ztráty(kW)
Ranní	2008.77	83.64	2306.36	92.36	63.69
Odpolední	2458.72	100.62	2630.45	103.57	87.49
Odchylka (%)	22.40	20.30	14.05	12.14	37.37

Tabulka 21 Porovnání středních hodnot a jejich odchylka u obou scénářů

Tabulka energií víceméně kopíruje hodnoty změn středních výkonů. Energie odebraná je o 22 % a 14 % vyšší. To přibližně odpovídá předpokladu, který vychází z 20 % nárůstu vlaků v oblasti. Nicméně celkové ztráty tento předpoklad převyšují, narostly o 37 %, to se projeví negativně na účinnosti, která klesá o dvě desetiny procenta.

Scénář	E NS 1 (kWh)	E NS 2 (kWh)	Celk.E ucinnost(%)	Celk.ztrat.E(kWh)
Ranní	4017.55	4612.71	98.77	127.37
Odpolední	4917.43	5260.91	98.57	174.98
Změna (%)	22.40	14.05	-0.21	37.37

Tabulka 22 Porovnání energií a jejich odchylka u obou scénářů

Maximální hodnoty pak v celkovém pohledu nemají tak velký vliv a jsou velmi závislé na skladbě vlaků v čase, a nikoliv na jejich celkovém počtu. Rozdíly maximálních hodnot nelze vztahovat na uváděnou hodnotu 20 %. Dle tabulky 23 jsou rozdíly maximálních dosažených okamžitých vzorků vyšší o vyšší jednotky procent.

Scénář	P NS 1 (kW)	Proud NS 1 (A)	P NS 2 (kW)	Proud NS 2 (A)
Ranní	10730.57	423.18	11181.40	421.66
	10642.16	419.68	11167.19	421.11
	10550.86	416.04	11154.70	420.62
Odpolední	11641.77	471.29	11594.74	435.73
	11617.41	470.17	11329.72	424.81
	11593.13	469.05	11287.19	423.93
Odchylna 1.max hodnoty (%)	8.49	11.37	3.70	3.34

Tabulka 23 Porovnání maximálních vzorků a odchylna u obou scénářů

6.3 Rekuperace

V systému napájení se uplatňuje rekuperování energie. Ve výsledkových tabulkách dat se to projeví záporným odebíraným výkonem napájecích stanic. Rekuperované špičkové výkony obou stanic nejsou zanedbatelné a mohou dosahovat i jednotky MW (z grafu 10). Odrekuperovaný výkon v daný moment ale může být ještě mnohem vyšší. Aktuální zatížení napájecích stanic totiž nevypovídá nic o tom, jak vlaky přenášejí výkon mezi sebou.

Pro nejpřesnější zjištění vlivu rekuperace na celkový odběr energie v oblasti byl vytvořen nový zadávací formulář, který kopíruje ranní scénář s tím rozdílem, že veškeré odrekuperované výkony jsou nahrazeny nulovým odběrem. Na trati tedy žádný vlak nerecuperuje. Výsledky z nového formuláře srovnává tabulka 24. Z hodnot celkové energie napájecích stanic je pak určen poměr odrekuperované energie vůči odebrané energii. Jedná se o výpočet s vzorkováním po 10s.

	Celk.dodana E(kWh)	Celk.spotřeb.E(kWh)	Celk.E vlaku(kWh)	Celk.E NS(kWh)
S rekuperací	10378.3	10250.24	8440.782	8568.85
Bez rekuperace	10070.37	9941.364	9941.364	10070.37

Tabulka 24 Porovnání vlivu rekuperace v ranním scénáři

Celková rekuperovaná energie (kWh)	1501.52
Rekuperovaná část (%)	14.91
Spotřebovaná část (%)	85.09

Tabulka 25 Poměrná část rekuperované a dodané energie v ranním scénáři

Dle tabulky 25 tvoří energie rekuperovaná 15 % ze spotřeby a zbylých 85 % je nutno dodat ze sítě. Z toho vyplývá, že rekuperace je užitečná a rekuperovaný výkon nelze zanedbávat. Dojde tak k ušetření až sedminy celkové spotřeby.

Tabulka 26 porovnává energii dodanou napájecími stanicemi do sítě s celkovou rekuperovanou energií. Výpočet rekuperované energie do sítě je stanoven na základě integrace záporných výkonů dodaných každou napájecí stanicí zvlášť. Objem vrácené energie do sítě oproti celkové rekuperované energii je malý. Z toho plyne, že si vlaky mezi sebou poměrně

efektivně předávají přebytečnou energii pouze v rámci sledované oblasti. Rekuperovaná energie do sítě je nežádoucí, pro distribuční síť bývá často problémem, a pokud není akceptována, musí být přebytečná energie mařena.

Celková rekuperovaná energie (kWh)	1501.52
Rekuperovaná E do sítě (kWh)	309.08

Tabulka 26 Porovnání rekuperovaných energií

Totéž bylo provedeno pro odpolední scénář. Byl vytvořen znovu nový formulář bez záporných výkonů a výsledky uspořádány do tabulek.

	Celk.dodaná E(kWh)	Celk.spotřeb.E(kWh)	Celk.E vlaku(kWh)	Celk.E NS(kWh)
S rekuperací	12167.35	11992.6	9978.552	10153.31
Bez rekuperace	11931.39	11756.85	11756.85	11931.39

Tabulka 27 Porovnání vlivu rekuperace v odpoledním scénáři

Celková rekuperovaná energie (kWh)	1778.08
Rekuperovaná část (%)	14.90
Spotřebovaná část (%)	85.10

Tabulka 28 Poměrná část rekuperované a dodané energie v odpoledním scénáři

Energie, v porovnání s ranním scénářem, jsou kvůli více vlakům vyšší. Zároveň vzrostla i rekuperovaná energie. Rozdíl celkových energií napájecích stanic mezi scénáři s rekuperací a bez činí 1778 kWh. To je o cca 18 % více než v ranním scénáři a přibližně to odpovídá nárůstu vlaků. Výsledné poměrové hodnoty energie spotřebované a rekuperované jsou velmi podobné a prakticky se neliší. Po zaokrouhlení je rozdělení také 15 % rekuperované energie a 85 % energie dodané ze sítě.

6.4 Měničové napájecí stanice

Poslední zkoumanou variantou bylo umístění do obou napájecích uzlů měničovou napájecí stanici. Byl vytvořen opět nový zadávací formulář. Došlo jen k úpravě při definici napájecích stanic. Ostatní buňky se oproti prvním simulacím nezměnily. Pro simulaci a srovnání byl použit interval výpočtu 1 sekunda a bude uvažován odpolední scénář, pro zdůraznění rozdílu.

Rozložení zatížení/odběru celkové energie se výrazně změnilo. Zatímco při transformátorové napájecí stanici více dodala stanice v České Lípě o zmíněných cca 7 %, při implementaci měničové stanice se situace obrátila a stanice v České Lípě dodala naopak o 20 % méně energie. Z toho plyne, že reálně je jízdou vlaků více zatížená oblast kolem Mladé Boleslavi a při kombinaci dvou typů napájecích stanic dochází k vyrovnání vlivem nevýhod transformátorové stanice, kde měničová stanice přebírá část výkonu. Naopak skutečné zatížení

se projeví, pokud jsou stanice stejné. Z modelu vyplývá, že původní návrh a umístění typu napájecích stanic se jeví jako dobré řešení napájení dané oblasti. Rozložení energií shrnuje tabulka 29.

	E NS 1 (kWh)	E NS 2 (kWh)	Celk.E účinnost(%)	Celk.ztrát.E(kWh)	Poměr zatížení (%)
Trafo	4917.43	5260.91	98.57	174.98	6.98
Měnič	5663.10	4503.99	98.66	163.73	-20.47

Tabulka 29 Porovnání energií a poměr zatížení dvou variant napájení v odpoledním scénáři

Důležitým parametrem porovnání obou variant je také celková energetická účinnost. Dle předchozí tabulky výpočty odpovídají teoretickým předpokladům, které uvažují vyšší účinnost měničových napájecích stanic. Napětí na těchto stanicích jsou tvrdší a přenesení stejného výkonu je možné při vyšším napětí a tím s nižším proudem. Ztráty $R \cdot I^2$ jsou proto menší. Nicméně rozdíl účinností není nikterak velký, jedná se o nízké desetiny procent, vypočítaný rozdíl modelem činí 0,1 %. Přesto je to nezpochybnitelná výhoda moderních měničových napájecích stanic, a při velkých odběrech je ušetřená energie nemalá.

Odběrová špička výkonu pro první napájecí stanici se výrazně zvýšila. U této stanice došlo ke změně a tím, že měničová napájecí stanice je tvrdý zdroj napětí, přebírá více zátěže od druhé stanice v porovnání s plánovanou transformátorovou stanicí. Výkonová špička přesahuje 13 MW. Tabulka 30 ilustruje maximální hodnoty odběru. Druhá napájecí stanice má maximální výkon o cca 7 % nižší. Špička odběru obou stanic dohromady nepatrně klesla. Díky menšímu poklesu napětí je energie dodávána z bližší napájecí stanice a ztráty na vedení jsou lehce nižší.

	P NS 1 (kW)	P NS 2 (kW)	Celk. P NS (kW)
Trafo	11641.77	11594.74	20132.52
	11617.41	11329.72	20080.30
	11593.13	11287.19	20031.27
Měnič	13502.43	10801.97	20096.58
	13473.09	10716.91	20043.88
	13443.80	10593.36	19996.61
Odchylka 1.max hodnoty (%)	15.98	-6.84	-0.18

Tabulka 30 Srovnání maximálních hodnot výkonů dvou variant napájení v odpoledním scénáři

Tabulka 31 nabízí porovnání středních hodnot a jejich procentuální odchylky. Napájecí stanice v Mladé Boleslavi dodala o 15 % větší výkon, naopak napájecí stanice v České Lípě dodala menší výkon.

	P NS 1 (kW)	Proud NS 1 (A)	P NS 2 (kW)	Proud NS 2 (A)
Trafo	2458.72	100.62	2630.45	103.57
Měnič	2831.16	113.48	2251.68	91.76
Odchylka	15.15	12.78	-14.40	-11.41

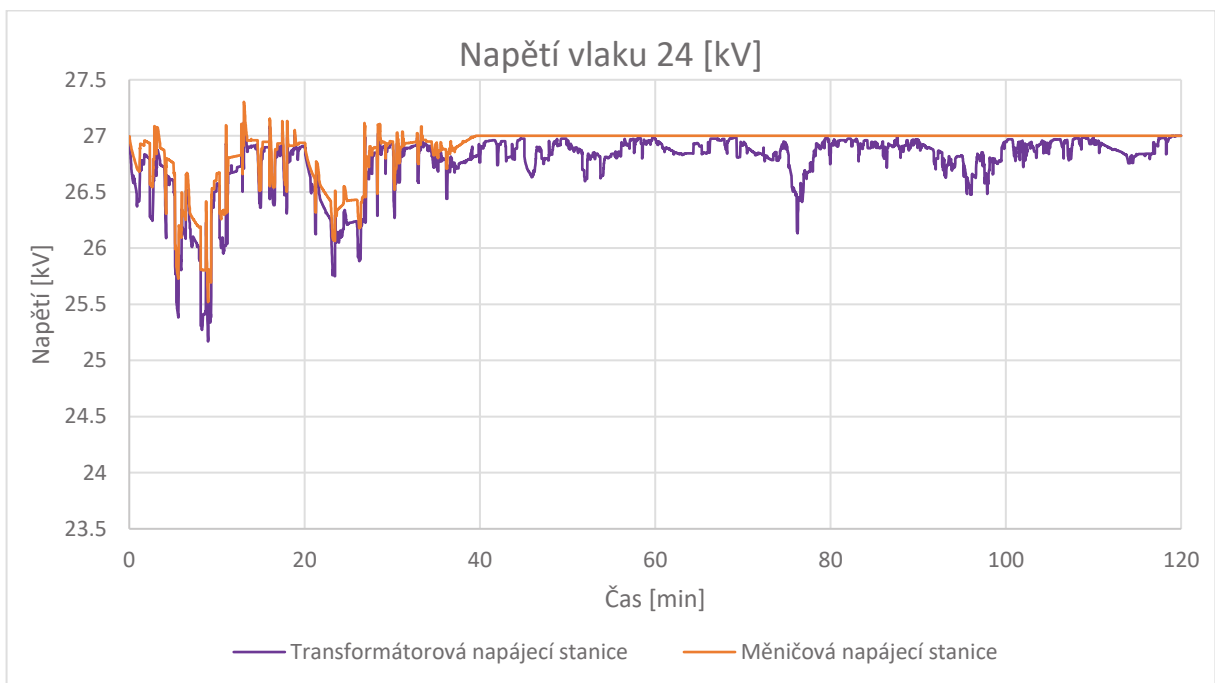
Tabulka 31 Srovnání středních hodnot dvou variant napájení v odpoledním scénáři

Vzhledem ke stabilnějšímu napětí napájecí stanice je vhodné porovnat směrodatnou odchylku odebraného výkonu, která určí variabilitu odběru. Střední hodnota celkového výkonu napájecích stanic je téměř podobná, rozdíl tvoří pouze již několikrát zmíněné ztráty. Rozdíl směrodatných odchylek je malý, avšak ve prospěch měničové napájecí stanice, která má tuto hodnotu nižší. Odběr při této variantě by tak měl být nepatrně stabilnější.

	Celk.P NS(kW)	Směrodatná odchylka
Trafo	5089.17	3151.31
Měnič	5082.84	3145.74

Tabulka 32 Srovnání variability celkového výkonu dvou variant napájení v odpoledním scénáři

Pro ilustraci chování rozdílných napájecích stanic přímo na sběrači vlaku byl opět vybrán jeden vlak. Na grafu 26 je závislost napětí v čase. Na první pohled je patrný rozdíl, kde od 40. minuty již vlak stojí v místě napájení (Mladá Boleslav) a kopíruje napětí uzlu. U měničové napájecí stanice je konstantní, 27 kV. V první části grafu pak jsou zřejmé rozdíly poklesu napětí, kde fialová křivka je téměř výhradně pod oranžovou.



Obrázek 26 Porovnání napětí na sběrači vlaku 24 pro dvě varianty napájení v odpoledním scénáři

Závěr

Cílem bylo vytvořit energetickou simulaci traťové struktury. Byl také otestován výpočetní model napájení a poprvé použit pro modelování rozsáhlejší oblasti. Lokalita severovýchodních Čech se, i díky plánované realizaci, nabízela k použití pro tyto účely. Zmíněná oblast je navíc již zpracována energetickým modelem pro náročnost samotných vlaků.

Za stručným popisem měničových napájecích stanic je blíže uveden plán realizace elektrifikace trati, která proběhne ve dvou etapách.

Krátce je popsán výpočetní model a jakým způsobem pracuje s daty. Všechny informace se předávají v tabulkách Excel. Jedná se o ranou fázi vývoje komplexního výpočetního modelu, proto je využit tento způsob. V návaznosti na další pokračování se předpokládá s uživatelsky přívětivější metodou práce s daty a také s kontrolou jejich správnosti. Samotné formuláře jsou nyní poměrně nepřehledné.

Dopravní scénáře mají za cíl vytvořit smysluplné zadání pro model se všemi parametry tak, aby se blížily reálnému provozu. Překlopení vytvořené jízdního řádu do zadávacích tabulek je časově poměrně náročná záležitost a pro další rozsáhlejší modely bude nutné najít flexibilnější způsob zadání, případně i propojení s energetickým modelem, který by rovnou vymodelované vlaky dle časových kritérií předával modelu pro napájení.

Výpočet modelu nebyl doprovázen žádnými vážnějšími problémy, které by způsobily výraznější zádrhel. Je nutné dbát na celkový počet uzlů (vlaky a rozsáhlost oblasti ve struktuře) a počítat s časovou náročností výpočtu.

Výstupy z modelu často potvrdily předpoklady. Celková účinnost napájení se pohybovala nad 98,5 %. Rekuperace vlaků tvořila 15% energie. Velkou část z této energie si vlaky předávají mezi sebou a zpět do sítě je přenášeno jen malé množství. Paradoxně při obou stanicích měničového charakteru došlo k většímu rozdílu v zatížení stanic. Reálně to ale odpovídá skladbě vlaků pohybujících se po trati, kde oblast kolem Mladé Boleslavi je více zatížená. Měničové stanice také dosahují vyšší účinnosti.

Použitá literatura

- [1] Žižlavský, P.: *Ročníkový projekt II, Měničové napájecí stanice pro trakční systém 25 kV, 50 Hz*, Univerzita Pardubice, 2021,
- [2] Novák, J., Mlynařík, L.: *Nové technologie trakčního napájení 25 kV 50 Hz 1. a 2. část*, časopis ELEKTRO, 2020, roč. 30, č. 6 a 7, vydavatel FCC Public, Praha 2020, ISSN 1210-0889.
- [3] Firemní materiály ABB. *ABB_Reference_Wulkuraka_EN_web*, dostupné online z: https://library.e.abb.com/public/8c0414f1fb0046489a762fa0930b687f/ABB_Reference_Wulkuraka_EN_web.pdf.
- [4] Interní materiály KEEZ
- [5] Mlynařík, Ladislav. *Elektrická trakce I*, studijní opora. Pardubice, 2011. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě.
- [6] Správa železnic, s.o., *Grafikon vlakové dopravy tratí 541, 540 a 537*, platí od: 13. prosince 2020, 2020
- [7] Sudop Brno, spol. s.r.o., Elektrizace železnic Praha, a.s., AŽD Praha s.r.o.: *Změna trakční soustavy na AC 25 kV, 50 Hz v úseku Nedakonice – Říkovice. Technická zpráva., PS 15-09-05*, červen 2020.
- [8] Doleček, R., Černý, O.: *Trakční napájecí soustavy*, studijní opora, Univerzita Pardubice, DFJP, 2014
- [9] ExtendOffice.com.: *Rozšiřující modul Kutools pro MS Excel.* © 2009-2021. Dostupný online z: <https://www.extendoffice.com/product/kutools-for-excel.html>
- [10] Správa železnic, s.o., *Sešitový jízdní řád tratí 541, 540 a 537*, platí od: 13. prosince 2020, 2020

Seznam obrázků

Obrázek 1	Blokové schéma měničové napájecí stanice [2].....	10
Obrázek 2	Výhledová mapa elektrifikace v severovýchodních Čechách [4]	15
Obrázek 3	Topologie pro výpočetní model [4].....	16
Obrázek 4	Náhradní schéma dvou vlaků v jednom úseku [2]	17
Obrázek 5	Mapka přiřazující čísla uzlů a úseků konkrétním místům.....	19
Obrázek 6	Vymodelovaný rychlík na trati Nymburk – Česká Lípa	25
Obrázek 7	Graf jízdního profilu vlaku Os 16002	29
Obrázek 8	Jízdní profil nákladního vlaku.....	30
Obrázek 9	Graf jízdního profilu vlaku Os 6625	31
Obrázek 10	Zatížení napájecích stanic v ranním scénáři.....	33
Obrázek 11	Spotřeba energií v ranním scénáři.....	34
Obrázek 12	Účinnost v ranním scénáři.....	35
Obrázek 13	Ilustrační mapka pohybu vybraných vlaků v ranním scénáři.....	36
Obrázek 14	Průběh napětí na sběrači vlaku 20 v ranním scénáři	37
Obrázek 15	Průběh napětí na sběrači vlaku 10 v ranním scénáři	37
Obrázek 16	Průběh napětí na sběrači vlaku 11 v ranním scénáři	38
Obrázek 17	Napětí uzlů 1-3 v ranním scénáři	39
Obrázek 18	Napětí uzlů 4-6 v ranním scénáři	40
Obrázek 19	Zatížení napájecích stanic v odpoledním scénáři	43
Obrázek 20	Porovnání celkového odebíraného výkonu u obou scénářů	44
Obrázek 21	Účinnost v odpoledním scénáři	44
Obrázek 22	Průběh napětí na sběrači vlaku 3 v odpoledním scénáři	45
Obrázek 23	Průběh napětí na sběrači vlaku 24 v odpoledním scénáři	46
Obrázek 24	Ilustrační mapka pohybu vybraných vlaků v odpoledním scénáři.....	46
Obrázek 25	Průběh napětí na sběrači vlaku 37 v odpoledním scénáři	47
Obrázek 26	Porovnání napětí na sběrači vlaku 24 pro dvě varianty napájení v odpoledním scénáři	52

Seznam tabulek

Tabulka 1 Zadání struktury trati	18
Tabulka 2 Definování napájecích stanic	18
Tabulka 3 Trasa konkrétního vlaku	18
Tabulka 4 Sloupce pro zadání aktuálních dat vlaku	19
Tabulka 5 Zadání doplňujících parametrů	19
Tabulka 6 Příklad vybraných sloupců výsledkové tabulky	20
Tabulka 7 Předepsané zastavení pro rychlíky a osobní vlaky	22
Tabulka 8 Část vytvořeného jízdního řádu pro ranní dopravní scénář	27
Tabulka 9 Stanovení četnosti nákladních vlaků v ranním scénáři	27
Tabulka 10 Ukázka jízdního řádu nákladních vlaků	27
Tabulka 11 Příklad křížení vlaků ranního scénáře	28
Tabulka 12 Část vytvořeného jízdního řádu pro odpolední scénář	30
Tabulka 13 Stanovení četnosti nákladních vlaků v odpoledním scénáři	30
Tabulka 14 Příklad křížení vlaků pro odpolední scénář	31
Tabulka 15 Minima a střední hodnoty napětí uzlů v ranním scénáři	39
Tabulka 16 Střední hodnoty a jejich odchylky v ranním scénáři	40
Tabulka 17 Energie a jejich odchylky v ranním scénáři	41
Tabulka 18 Maximální navzorkované hodnoty a jejich odchylky v ranním scénáři	41
Tabulka 19 Minima napětí na sběračích vybraných vlaků a jejich odchylky v ranním scénáři	42
Tabulka 20 Minima napětí na sběračích vybraných vlaků v odpoledním scénáři	47
Tabulka 21 Porovnání středních hodnot a jejich odchylka u obou scénářů	48
Tabulka 22 Porovnání energií a jejich odchylka u obou scénářů	48
Tabulka 23 Porovnání maximálních vzorků a odchylka u obou scénářů	49
Tabulka 24 Porovnání vlivu rekuperace v ranním scénáři	49
Tabulka 25 Poměrná část rekuperované a dodané energie v ranním scénáři	49
Tabulka 26 Porovnání rekuperovaných energií	50
Tabulka 27 Porovnání vlivu rekuperace v odpoledním scénáři	50
Tabulka 28 Poměrná část rekuperované a dodané energie v odpoledním scénáři	50
Tabulka 29 Porovnání energií a poměr zatížení dvou variant napájení v odpoledním scénáři	51
Tabulka 30 Srovnání maximálních hodnot výkonů dvou variant napájení v odpoledním scénáři	51

Tabulka 31 Srovnání středních hodnot dvou variant napájení v odpoledním scénáři	52
Tabulka 32 Srovnání variability celkového výkonu dvou variant napájení v odpoledním scénáři	52

Seznam příloh

Příloha A – Jízdní řád ve formátu .xlsx

Příloha B – Složka vyplněných souborů zadávacích formulářů .xlsx

Příloha C – Složka upravených souborů výsledků .xlsx