

Univerzita Pardubice

Dopravní fakulta Jana Pernera

Energetická optimalizace jízdy kolejového vozidla

Lukáš Kulich

Bakalářská práce

2018

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Lukáš Kulich
Osobní číslo: D14259
Studijní program: B3709 Dopravní technologie a spoje
Studijní obor: Elektrotechnické a elektronické systémy v dopravě
Název tématu: Energetická optimalizace jízdy kolejového vozidla
Zadávající katedra: Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací
techniky v dopravě

Zásady pro v y p r a c o v á n í:

1. Popište tok výkonu a energie pohonným systémem v příměstské elektrické jednotce
2. Proveďte výpočty pro energetickou optimalizaci jednotlivých částí jízdní trajektorie
3. Navrhněte energeticky optimální profil jízdní trajektorie příměstské elektrické jednotky mezi dvěma zastávkami

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

Danzer, J., Šašek, J.: Elektrická trakce IV., skriptum ZČU v Plzni, FEL, ISBN 978-80-7043-586-1

Vedoucí bakalářské práce:

prof. Ing. Jaroslav Novák, CSc.

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací
techniky v dopravě

Datum zadání bakalářské práce: **27. listopadu 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2017**


doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.

děkan

L.S.


Ing. Dušan Čermák, Ph.D.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 23. března 2017

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 17. 05. 2018

Lukáš Kulich

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce, panu prof. Ing. Jaroslavu Novákovi, CSc. za jeho čas, rady a poskytnuté materiály, které byly pro vyhotovení této práce nezbytné. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Ladislav Mlynaříkovi, Ph.D. za poskytnuté konzultace. Na závěr bych chtěl poděkovat celé své rodině za podporu během studia.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá energetickou optimalizací jízdy kolejového vozidla. Přebírá poznatky získané měřením a teoretickými výpočty na základě parametrů experimentálního vozítka Dopravní fakulty Univerzity Pardubice ty dále rozvíjí a aplikuje na reálné kolejové vozidlo. Tato práce začíná obecným přístupem k optimalizaci jízdního profilu. V druhé části rozebírá a rozvíjí poznatky získané za pomoci experimentálního vozítka. A na konec v třetí části se dostáváme k aplikaci těchto poznatků na skutečné vozidlo železniční dopravy.

Klíčová slova

Optimální jízdní profil, experimentální vozidlo, hybridizovaná jednotka

Title

Energetic Optimization of Railway Vehicle Drive

Annotation

This bachelor thesis deals with the energy optimization of the rolling stock. It takes over the knowledge gained from the measurement and the theoretical calculations based on the parameters of the experimental vehicle of the Faculty of Transportation Engineering of the University of Pardubice which further develops and applies them to a real rail vehicle. This work begins with a general approach to optimizing the driving profile. In the second part, we analyze and develop the knowledge gained from the experimental vehicle.

Finally, in the third part, we come to apply this knowledge to a real rail transport vehicle.

Keywords

Optimal driving profile, experimental vehicle, hybridized unit

Obsah

Úvod	1
1 Obecný přístup k problematice optimalizace jízdního profilu	3
2 Návrh metodiky optimálního řízení aplikovaný na experimentální kolejové vozidlo.....	5
2.1 Technické řešení a energetický řetězec experimentálního kolejového vozidla	5
2.2 Složky kladoucí nároky na příkon a jejich teoretické zohlednění ve výpočtech.....	6
2.3 Optimalizace jízdní trajektorie při rozjezdu experimentálního vozidla.....	10
3 Návrh metodiky optimálního řízení aplikovaný na reálné kolejové vozidlo	24
3.1 Technické řešení a energetický řetězec reálného kolejového vozidla	24
3.2 Zohlednění rozdílnosti složek kladoucí nároky na výkon a nastínění jejich řešení	25
3.3 Optimalizace jízdní trajektorie při rozjezdu reálného kolejového vozidla	28
3.4 Porovnání numerických výsledků s výsledky ze simulačního systému pro případ reálného kolejového vozidla.....	42
Závěr	43
Použitá literatura.....	44
Seznam obrázků	45
Seznam tabulek	47
Seznam příloh.....	51
Přílohy.....	52

Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá optimalizací jízdního profilu pro kolejové vozidlo napájené akumulátorovými bateriemi a její závěry jsou uplatnitelné ve všech třech hlavních variantách provedení pohonného řetězce dopravních železničních vozidel.

Varianty pohonného řetězce:

1. Sériový, sérioparalelní nebo paralelní hybridní pohon se spalovacím motorem
2. Čistě akumulátorově napájený trakční pohon
3. Vozidlo s kombinovaným napájením z troleje a z akumulátoru

Motivací pro vytvoření této práce je skutečnost, že akumulátorové napájení železničních vozidel představuje perspektivní alternativu pro z hospodárnění provozu na vedlejších tratích bez elektrizace s významnými přínosy pro životní prostředí a komfort jízdy. Další perspektivní oblastí pro akumulátorové napájení železničních vozidel a uplatnění poznatků z této práce je pohon posunovacích lokomotiv, kde při zrychlení z klidového stavu na určitou rychlost jsou značné energetické nároky.

I když jsou závěry této studie využitelné ve všech třech uvedených variantách pohonného řetězce, budou následující úvahy orientovány především do oblasti vozidel pro regionální osobní dopravu při akumulátorovém napájení – ať již jde o vozidlo čistě akumulátorové, nebo vozidlo s kombinovaným napájením z troleje a z akumulátoru dobíjené při jízdě po elektrifikovaném úseku a využívající akumulátor při jízdě po neelektrifikovaném úseku trati.

Při akumulátorovém napájení je provoz vozidla podmíněn splněním tří požadavků:

1. Pro danou trať a vozidlo je nutné mít k dispozici akumulátorovou baterii s dostatečnou kapacitou pro pokrytí trakčních i pomocných spotřeb, která má zároveň akceptovatelné parametry s ohledem na zástavbu do vozidla
2. Pro danou trať a vozidlo je nutné mít k dispozici akumulátorovou baterii schopnou dodávky potřebného okamžitého výkonu, která má zároveň akceptovatelné parametry s ohledem na zástavbu do vozidla
3. V rámci provozního režimu musí být zajištěn dostatek času pro dobití akumulátorové baterie – ať již při jízdě na elektrifikovaném úseku u vozidla s kombinovaným napájením, nebo při pobytu v zastávkách či při odstavení vozidla

V současnosti jsou pro trakci nejvhodnější akumulátory na bázi Li. V případě Li akumulátorů jsou výše uvedené tři požadavky vzájemně provázány – s růstem kapacity, výkonu a životnosti baterie roste její hmotnost a cena. Specifikace pohonného řetězce proto musí zahrnovat vzájemné sladění parametrů vozidla, tratě a akumulátorové baterie s cílem minimalizace hmotnosti, objemu a ceny akumulátorové baterie a maximalizace životnosti. K dosažení co nejvyššího efektu akumulátorového napájení – tj. dosažení co největšího dojezdu a výkonu vozidla a co nejvyšší životnosti akumulátorové baterie při minimalizaci jejího objemu, hmotnosti a ceny lze směřovat jednou ze tří možných cest, nejlépe však jejich kombinací:

1. Zvyšování parametrů akumulátorů, zejména jejich měrné kapacity vztažené na jednotku hmotnosti a objemu a měrného výkonu
2. Zvyšování účinnosti komponent pohonného řetězce a pomocných spotřeb – jedná se o zvyšování účinnosti polovodičových měničů, točivých i netočivých elektrických strojů, snižování spotřeby osvětlovacích, topných a klimatizačních systémů
3. Hybridizace doplněním pomocného alternativního zdroje (fotovoltaika)
4. Minimalizace spotřeby trakční energie cestou optimalizace rychlostního profilu při jízdě vozidla

Jak již bylo výše zmíněno tato studie se orientuje právě na nalezení optimálního rychlostního profilu při jízdě kolejového vozidla. Optimalizaci rychlostního profilu však obecně nelze podřídít pouze jedinému kritériu – minimalizace spotřeby energie, ale je nutno zohlednit i další požadavky kladené na jízdu vozidla. Celkově lze tyto požadavky shrnout do následujících bodů:

1. Minimální spotřeba energie
2. Minimální jízdní doba, resp. dodržení jízdního řádu
3. Dodržení ergonomických požadavků na jízdní profil, tj. omezení hodnot časové derivace zrychlení, tedy hodnot třetí derivace dráhy s : $\frac{d^3s}{dt^3}$.

Na základě faktů a požadavků výše zmíněných je v této studii hledán za pomoci výpočtů a měření na experimentálním kolejovém vozidlu, kterým disponuje Dopravní fakulta Univerzity Pardubice ideální jízdní profil pro reálný vlak regionální dopravy, jehož hlavní parametry a rozdíly od experimentálního vozidla budou dále zmíněny při řešení dané problematiky.

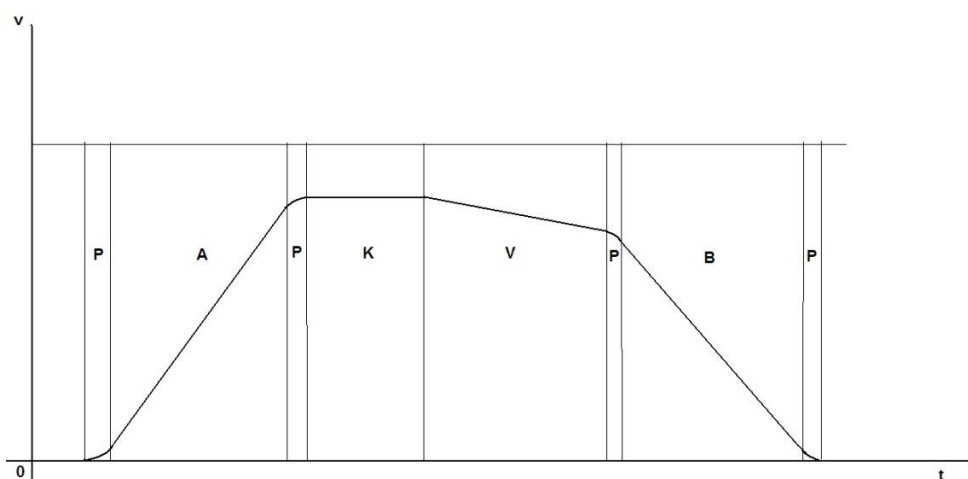
Na konci této práce bude shrnutí poznatků a vyjádření k využitelnosti akumulátorového napájení v oblasti železniční dopravy za předpokladu dosažení ideálního jízdního profilu kolejového vozidla.

1 Obecný přístup k problematice optimalizace jízdního profilu

Většina metod, která se zabývá rozpracováním návrhu optimálního jízdního profilu kolejového vozidla využívá velkého výpočetního výkonu moderních prostředků řídicí techniky a výpočtu řady možností rychlostních profilů v závislosti na projížděné trati, parametrech vozidla a popřípadě i on-line na aktuální poloze vozidla na trati a jeho okamžité rychlosti. Příkladem je metoda představená v [4].

Další úlohou řídicího systému vozidla je zajišťovat, prakticky nezávisle, automatickou zpětnovazební regulaci rychlosti, na jejíž kvalitě je závislá i přesnost dodržení předepsaného rychlostního profilu.

Zde popisovaná metoda v maximální možné míře využívá obecných analytických výpočtů a v jednom algoritmu sdružuje postupy pro dodržení profilu rychlosti a zpětnovazební regulace rychlosti vozidla.



Obrázek 1 Profil rychlosti při jízdě vozidla, zdroj [4]

Profil rychlosti při jízdě vozidla lze rozčlenit do několika typů trajektorií – Obrázek 1:

P – interval výrazné změny zrychlení

A – zrychlování

K – jízda s konstantní rychlostí

V – výběh

B – brzdění

V technice průmyslových pohonů jsou za dobu pracovního cyklu zpravidla kladeny požadavky pouze na hodnotu zrychlení, konstantní – ustálené rychlosti a záporného zrychlení při zpomalování, kritériem parametrů trajektorie jsou technické požadavky poháněné technologie a dodržení trajektorie zajišťuje standardně lineární PI regulátor.

Při pohonu vozidel je třeba zahrnout více kritérií optimálního řízení (jízdní doba, spotřeba energie, ergonomické požadavky – jak bylo uvedeno v úvodu), vozidlo navíc zpravidla nelze rychlostně regulovat s dostatečně malou regulační odchylkou ve všech typech trajektorie stejně, například prostým PI regulátorem rychlosti. To je dáno především složitostí vozidla jako fyzikální soustavy, velkými setrvačnými hmotami, proměnnými parametry a limitovanými velikostmi akčních zásahů.

V jednotlivých částech rychlostního profilu je vhodné uplatňovat různá kritéria. Například v intervalech P podle obrázku. 1, kdy se významně mění hodnota zrychlení, je nutno preferovat ergonomické požadavky, neboť z hlediska jízdního komfortu jsou velice citelné rychlé změny zrychlení, tedy nepřiměřené hodnoty třetí časové derivace dráhy $s: \frac{d^3s}{dt^3}$. Trajektorie v intervalech P tedy musí být navrhována především s ohledem na podmínku:

$$\frac{d^3}{dt^3} < \textit{kritické} \quad (1)$$

V intervalech zrychlování A pracuje trakční pohon s velkými výkony v relativně krátkých časových intervalech. Vliv intervalů A na celkový odběr energie je zásadní, neboť výkon potřebný na překonání jízdních odporů je doplněn o dynamický – urychlující výkon. Vliv délky těchto časových intervalů, nebo jejich podstatné části, na celkovou jízdní dobu je méně významný. Z uvedeného vyplývá vhodnost preference kritéria minimální odebrané energie během zrychlování. V intervalu jízdy s přibližně konstantní rychlostí K je zpravidla třeba využívat traťovou rychlost daného úseku s cílem dodržení krátké jízdní doby. I při kopírování konstantní traťové rychlosti je však možné uplatnit rozdílné postupy, rozhodujícím kritériem pro volbu konkrétního postupu je pak minimální spotřeba energie.

V intervalu výběhu V není odeběrána trakční energie. Je však nutno řešit otázku volby okamžiku přechodu do výběhu. Zde je vhodné uplatnit energetické kritérium s dřívějším přechodem do výběhu v případě, že není tlak na minimalizaci jízdní doby. Naopak při požadavku na zkrácení jízdní doby je možno interval výběhu zcela vynechat.

V intervalu brzdění B je z energetického hlediska nejvhodnější maximalizace rekuperované energie.

Četnost případů optimalizace se zvýší, uvážíme-li případy jízdy ze spádu, kdy aktivní složka síly daná gravitací převyšuje pasivní jízdní odpory.

V následujících kapitolách bude analyzována část zrychlování z hlediska velikosti trakční energie při rozjezdu odebrané z napájecího zdroje. Problematika bude analyzována pro případ dvou vozidel – pro případ experimentálního kolejového vozidla, kterým disponuje DFJP Univerzity Pardubice a na kterém bude prováděno testování navržených postupů, a dále pro případ dvou vozové železniční jednotky pro regionální osobní dopravu.

2 Návrh metodiky optimálního řízení aplikovaný na experimentální kolejové vozidlo

2.1 Technické řešení a energetický řetězec experimentálního kolejového vozidla

Experimentální kolejové vozidlo, kterým disponuje Dopravní fakulta Univerzity Pardubice, má tyto základní konstrukční parametry, jež byli brány v potaz:

rozchod	600 mm
uspořádání dvojkolí	B61
délka	3000 mm
šířka	1900 mm
rozvor podvozku	800 mm
hmotnost vč. akumulátorové baterie	1710 kg
uvažovaná hmotnost včetně posádky	2200 kg
průměr kol	450 mm

Tabulka 1 Konstrukční parametry vozítka, zdroj [4]

V otázce pohonného řetězce lze říci, že se jedná se o vozidlo s jedním hnacím podvozkem, v němž jsou umístěna čtyři nezávisle otáčivá kola s individuálními bez převodovkovými pohony synchronními motory s permanentními magnety. Motory jsou individuálně napájeny ze čtveřice střídačů. Napájení stejnosměrné sběrnice vozidla zajišťuje akumulátorová baterie s 28. lithium fosfátovými články.

Hlavní parametry pohonu experimentálního vozidla jsou umístěny v následující tabulce:

napětí stejnosměrné silové sběrnice	89,6V
jmenovité napětí jednoho článku akumulátorové baterie	3,2V
počet článků akumulátorové baterie	28
kapacita akumulátorové baterie	100Ah
odpor článku akumulátorové baterie	0,0015Ω
celkový odpor akumulátorové baterie	0,042Ω
trvalý moment motoru	52,5Nm
maximální moment motoru	80,6Nm
trvalý proud motoru	18,5A
maximální proud motoru	28,4A
výkon motoru při 20 km/h a 52,5Nm	1297 W
momentová konstanta motoru	2,8Nm/A
napěťová konstanta motoru	183,1V/1000ot/min počet
pólpárů motoru	5
indukčnost fáze statorového vinutí	4mH
odpor fáze statorového vinutí za studena	0,24Ω
otáčky motoru při 20 km/h	236ot/min frekvence
napětí statoru při 20 km/h	19,7Hz

tažná síla na jednom kole při momentu 52,5Nm a proudu 18,5A	233 N
celková tažná síla vozidla při momentu 52,5Nm a proudu 18,5A	932 N
maximální celková tažná síla na kolech při momentu 80,6Nm	1431 N
konstanta úměrnosti mezi proudem motoru a celkovou. tažnou silou	50,4N/A

Tabulka 2 Parametrů pohonu experimentálního vozidla, zdroj [4]

Kompletní technický výkres vozítka je stejně, jako schéma výkonného obvodu vozidla zanesen v příloze.

2.2 Složky kladoucí nároky na příkon a jejich teoretické zohlednění ve výpočtech

Při jízdě vozidla rychlostí v je okamžitý příkon pohonů tvořen několika složkami:

- složka daná konstantními silovými mechanickými jízdními odpory vozidla a mechanickými ztrátami P_{MECH} složka výkonu potřebná na překonání
- složka výkonu potřebná na překonání stoupáním je dána výkon P_S potřebný na jeho překonání
- výkon potřebný na překonání odporu vzduchu P_{VZ}
- výkon potřebný ke zrychlení vozidla o zadané hmotnosti P_a
- ztrát v železe trakčních motorů P_{Fe} celkový výkon ztrát v odporech vinutí R_M
- čtyř třífázových trakčních motorů P_j
- výkon ztrát v trakčním střídači $P_{DC/AC}$
- výkon ztrát ve vnitřním odporu akumulátoru P_{AKU}

Při analytickém a numerickém výpočtu výkonových a silových poměrů vozidla je třeba z důvodu jednoznačné řešitelnosti definovat, jakým způsobem budou jednotlivé složky respektovány.

Dále jsou uvedeny tyto předpoklady:

1. Výkon ztrát v železe trakčních motorů je dán Steinmetzovým vztahem:

$$P_{Fe} = k_{Fe} B^2 f^{1,3} \quad (2)$$

V tomto vztahu značí k_{Fe} konstantu úměrnosti, B magnetickou indukci a f frekvenci magnetické indukce, resp. magnetického toku. V případě experimentálního vozidla není prakticky uvažován režim odbuzování, který bude hrát svou roli při numerických výpočtech dané metodiky aplikované na RegioPantera. V tomto případě lze magnetickou indukci a magnetický tok uvažovat jako konstantní. Pro řešitelnost úlohy bude uvažována v dalších výpočtech závislost ztrát v železe na první mocnině frekvence. Zároveň lze uvážit u frekvenčně řízených pohonů s asynchronními a synchronními motory přímou úměru mezi napájecí frekvencí trakčních motorů a rychlostí vozidla $v \approx f$. Potom lze pro výkon ztrát v železe psát:

$$P_{Fe} = F_{Fe} \cdot v \quad (3)$$

Po matematické stránce lze konstantu úměrnosti F_{Fe} , která zohledňuje stálý magnetický tok a lineární závislost mezi rychlostí vozidla, ztrátovým výkonem v železe a napájecí frekvencí trakčních motorů, formálně chápat jako část konstantních jízdních odporů – sil působících při jízdě vozidla.

2. Charakter konstantního jízdního odporu – síly má rovněž odpor ze stoupání F_S
3. To nám umožňuje složit do jednoho členu F_{SK} konstantní složky jízdních odporů:

$$F_{SK} = F_K + F_S + F_{Fe} \quad (4)$$

Tomu je úměrná složka výkonu vozidla P_{SK} , která je lineárně závislá na rychlosti:

$$P_{SK} = F_{SK} \cdot v \quad (5)$$

4. Odpor vzduchu je závislý na druhé mocnině rychlosti:

$$F_{VZD} = k_{VZD} \cdot v^2 \quad (6)$$

Odpovídající výkon je potom úměrný třetí mocnině rychlosti:

$$P_{VZD} = F_{VZD} \cdot v^3 \quad (7)$$

Tuto složku a její proměnlivost při jízdě experimentálního vozidla s rychlostí do 20 km/h jsme při analytickém výpočtu zanedbali a pracovali s ní pouze při numerickém výpočtu.

5. Výkon P_a potřebný ke zrychlení je dán:

$$P_a = (m + m_{rk}) \cdot a \cdot v \quad (8)$$

Tento výkon je dán hmotností vozidla m , zrychlením a , rychlostí v , ale také redukovanou hmotností m_{rk} , která respektuje setrvačné hmoty akumulující kinetickou energii ve formě rotačního pohybu. Vzhledem k relativně malé velikosti m_{rk} vůči m je tato veličina v případě experimentálního vozítka zanedbána a je uvažována mechanická setrvačnost daná pouze hmotností vozidla m . Potom je výkon potřebný ke zrychlení dán:

$$P_a = m \cdot a \cdot v \quad (9)$$

V případě uvažování pouze konstantních jízdních odporů F_{SK} je při konstantní tažné síle vozidla F_t konstantní i zrychlení a . V případě započtení nekonstantního jízdního odporu vzduchu F_{VZD} je při konstantní tažné síle nekonstantní zrychlení, což činí rozdíly ve výpočtech potřebného výkonu analytickou cestou a numerickou.

6. Výkon potřebný pro pokrytí Joulových ztrát ve vinutí motoru P_J je úměrný druhé mocnině protékajícího proudu I_M a odporu vinutí R_M :

$$P_J \approx R_M \cdot I_M^2 \quad (10)$$

Pro případ experimentálního vozidla se čtyřmi souměrnými třífázovými synchronními trakčními motory s permanentními magnety jsou celkové Joulovy ztráty motorů dány výrazem:

$$P_J \approx 4 \cdot 3 \cdot R_M \cdot I_M^2 \quad (11)$$

V případě synchronních trakčních motorů je odpor R_M pouze odporem statorového vinutí. V případě vozidel s asynchronními trakčními motory je nutno odpor R_M uvažovat jako součet odporu statorového vinutí a přepočteného odporu rotorového vinutí.

V případě synchronního trakčního motoru, který je provozován pouze v oblasti s plným magnetickým tokem, tedy bez odbuzování, je možné uvažovat lineární závislost mezi proudem motoru I_M , jeho momentem M a tažnou silou vozidla F_t . V případě experimentálního vozidla se čtyřmi trakčními motory je potom možné zavést konstantu úměrnosti mezi proudem motoru a tažnou silou vozidla K_R podle vztahu:

$$F_t = K_R \cdot I_M \quad (12)$$

Celkové Joulovy ztráty jsou pak dány vztahem:

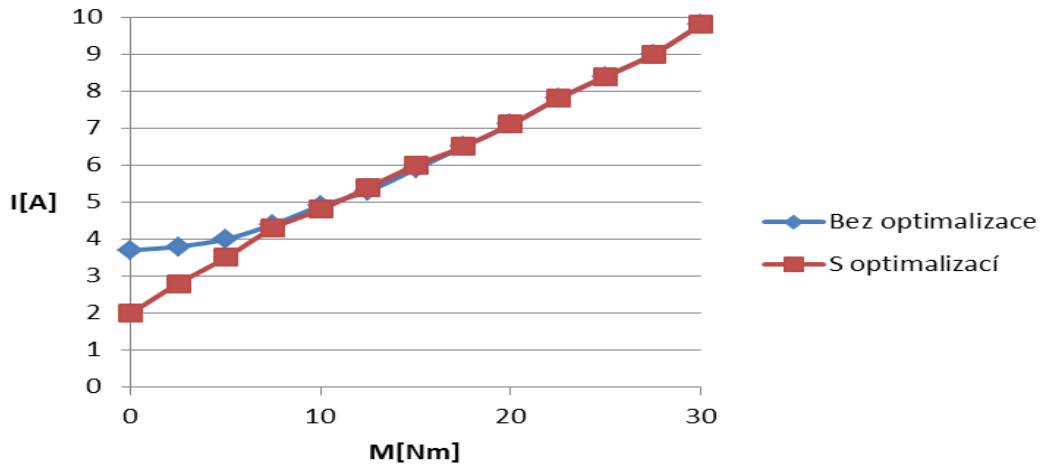
$$P_J = 4 \cdot 3 \cdot R_M \cdot \left(\frac{F_t}{K_R}\right)^2 \quad (13)$$

V případě asynchronního trakčního motoru obecně neplatí lineární závislost mezi momentem a proudem vlivem magnetizační složky proudu. V trakčních pohonech s asynchronními motory se používá optimalizace magnetického toku podle zadané hodnoty momentu s cílem zmenšení magnetizačních ztrát v motoru a zvýšení účinnosti. V tomto režimu se poněkud mění i charakter závislosti momentu motoru na efektivní hodnotě proudu. Pro získání kvantitativní představy o charakteru této závislosti bylo provedeno srovnávací měření na laboratorním pohonu s asynchronním motorem 4kW, který byl napájen z frekvenčního měniče Siemens Master Drives, který rovněž režim optimalizace magnetického toku umožňuje. Výsledky měření závislosti momentu na proudu motoru bez optimalizace magnetického toku a s optimalizací magnetického toku jsou uvedeny v tabulce 3 a na obrázku 2.

$M[N \cdot m]$	0	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0	22,5	25,0	27,5	30,0
$I[A]$	3,7	3,8	4,0	4,4	4,9	5,3	5,9	6,5	7,1	7,8	8,4	9,0	9,8
$I_{opt}[A]$	2,0	2,8	3,5	4,3	4,8	5,4	6,0	6,5	7,1	7,8	8,4	9,0	9,8

Tabulka 3 Závislosti proudu asynchronního motoru na momentu bez optimalizace a s optimalizací magnetického toku, zdroj

[4]



Obrázek 2 Závislost proudu asynchronního motoru na momentu bez optimalizace a s optimalizací magnetického toku, zdroj [4]

Z výsledků uvedených měření je zřejmé, že v případě optimalizace magnetického toku se závislost momentu na proudu přibližuje přímce. Při výpočtech reálných vozidel bude proto, stejně jako u synchronního motoru, uvažována lineární závislost mezi proudem a momentem. Jak vyplývá z obrázku 2, je však v případě asynchronního motoru s optimalizovaným magnetickým tokem lineární závislost proudu zvětšena o hodnotu minimální magnetizační složky proudu I_0 a pro ztráty jednoho motoru platí:

$$P_J = R_M \cdot \left(\frac{F_t}{K_R} + I_0 \right)^2 \quad (14)$$

7. Ztrátový výkon v trakčním střídači $P_{DC/AC}$ je relativně malý vzhledem k vysoké účinnosti polovodičových měničů obecně (přes 95%). V dalších úvahách nebude proto tento ztrátový výkon uvažován, $P_{DC/AC} = 0$ a to, jak v části s experimentálním vozítkem, tak i v části s RegioPanterem.
8. Pro určení ztrátového výkonu v akumulátoru P_{AKU} je uvažováno náhradní schéma akumulátorové baterie jako sériová kombinace ideálního zdroje vnitřního napětí U_0 a sériově řazeného vnitřního odporu akumulátorové baterie R_0 . Při odběru proudu I_{DC} z akumulátorové baterie vzniká na vnitřním odporu R_0 úbytek napětí a klesá svorkové napětí. Pro následující úvahy však bude toto kolísání napětí akumulátorové baterie zanedbáno a napětí akumulátorové baterie bude uvažováno konstantní, $U_{DC} = \text{konstanta}$.
9. Při určení síly odporu v oblouku F_0 , která je závislá jen na hmotnosti vozidla m a poloměru pojižděného oblouku, se obvykle vychází z empirického vztahu:

$$F_0 = \frac{6500000}{r - 55} \quad (15)$$

Sílu odporu v oblouku lze započítat do jízdních odporů nezávislých na rychlosti, tedy do síly F_{SK} . Vztah (15) platí pro vozidla s normálním rozchodem. Při měřeních na experimentálním vozidle je tato síla minimalizována vlivem použití podvozku s nezávisle otáčivými koly.

Z výše uvedených bodů je zřejmé, že ve výpočtech bude nadále uvažována následující výkonová bilance vozidla, tj. rozdělení výkonu vozidla P_{CELK} :

$$P_{CELK} = P_{SK} + P_{VZD} + P_a + P_J + P_{AKU} \quad (16)$$

. Vzhledem k malým rychlostem experimentálního vozidla do 20 km/h se dá očekávat, že rozdíl mezi analytickými a numerickými výpočty v tomto případě nebude příliš výrazný, když při analytickém výpočtu použijeme vzorec odvozený v odcitované práci: **Optimalizace jízdního profilu pro kolejové vozidlo s akumulátorovým napájením**, který uvažuje $P_{VZD} = 0$

V tento okamžik tedy uvažujeme v analytickém výpočtu, že pro experimentální vozidlo platí vztah pro vyjádření celkového výkonu tento:

$$P_{CELK} = P_{SK} + P_a + P_J + P_{AKU} = F_{SK} \cdot v + m \cdot a \cdot v + R_M \cdot \left(\frac{F_t}{K_R}\right)^2 + R_0 \cdot v^2 \quad (17)$$

2.3 Optimalizace jízdní trajektorie při rozjezdu experimentálního vozidla

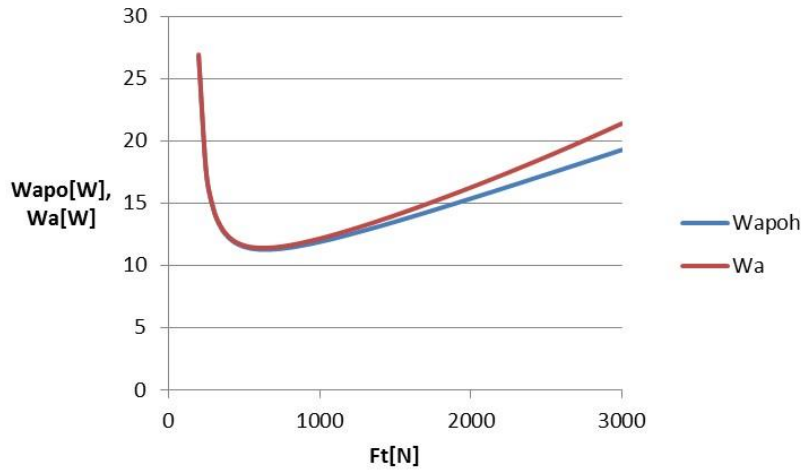
V této práci je věnována pozornost optimalizaci jízdní trajektorie při zrychlování vozidla, jedná se tedy o interval označený na **obrázku 1** symbolem **A**. V případě analytického výpočtu výkonu experimentálního vozidla, kdy jsou uvažovány pouze konstantní mechanické jízdní odpory F_{SK} , se bude vozidlo při konstantní tažné síle F_t pohybovat s konstantním zrychlením a . Jak bylo uvedeno výše, kritériem pro optimalizaci rozjezdu vozidla z počáteční rychlosti v_1 na konečnou rychlost v_2 je odběr minimální energie W_a za dobu zrychlování t_a :

V případě numerického výpočtu tomu tak nebude, neboť zde s odporem vzduchu počítáme, ale jak již bylo zmíněno výše rozdíly by měly být minimální vzhledem k nízkým rychlostem.

Pokud tedy vyjdeme pro analyticky spočtenou křivku z poznatků zmíněných v předcházející části. Dovede nás to ke vzorci, že celková energetická náročnost na rozjezd odpovídá:

$$W_a = \int_0^{t_a} P_{CELK} \cdot dt = \int_0^{t_a} (P_{SK} + P_a + P_J + P_{AKU}) \cdot dt = \min \quad (18)$$

Již v práci zmíněné výše bylo dokázáno, že v oblasti extrému neboli energetického minima P_{AKU} nehraje takřka žádnou roli, což dokládá následující graf.



Obrázek 3 Závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 16 km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu – porovnání se zahrnutím ztrát v akumulátorové baterii, zdroj [4]

Na tomto grafu je tažná síla při minimu energie spotřebované na rozjezd téměř totožná pro případ vyšetřování energie samotného pohonu (modrá křivka) a pro případ se zahrnutím ztrátové energie v akumulátorové baterii (červená křivka).

Vzhledem k velmi malému navýšení spotřebované energie v oblasti optimální tažné síly vlivem ztrát v akumulátorové baterii je možno uvažovat konstantní napětí akumulátorové baterie U_{DC} a psát tedy pro celkovou energetickou náročnost vzorec ve tvaru:

$$W_a = \int_0^{t_a} P_{CELK} \cdot dt = \int_0^{t_a} (P_{SK} + P_a + P_f) \cdot dt = \min \quad (19)$$

Po integraci výrazu v (19) vznikl výraz pro konstantní tažnou sílu F_t a konstantní zrychlení a , jehož výsledkem je potřebná energie W_{apoh} na zrychlení vozidla z počáteční rychlosti v_1 na konečnou rychlost vozidla v_2 :

$$W_{apoh} = \frac{F_{SK} \cdot m}{2 \cdot (F_t - F_{SK})} \cdot (v_2^2 - v_1^2) + \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_2^2 - v_1^2) + 4 \cdot 3 \cdot R_M \cdot \frac{m}{F_t - F_{SK}} \cdot \left(\frac{F_t}{K_R}\right)^2 \cdot (v_2 - v_1) \quad (20)$$

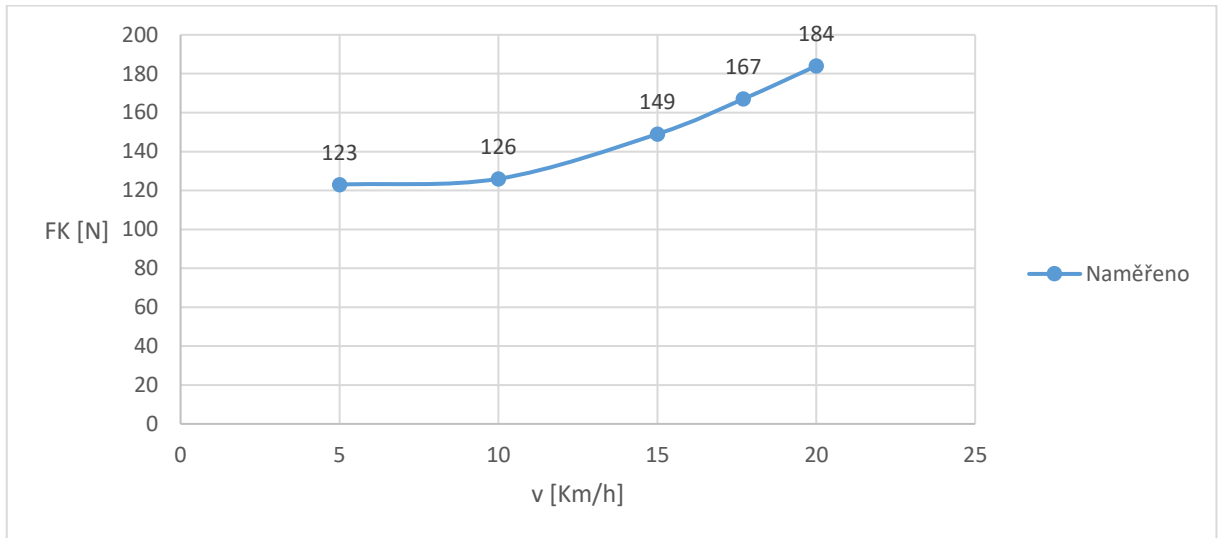
Vstupní hodnoty, jež musíme znát jak pro dosazení do vzorce (20) zjištěného analyticky tak pro práci s numerickými výpočty jsou tyto:

- konstanta úměrnosti mezi proudem motoru a celkovou tažnou silou $K_R = 50,4 \text{ N/A}$ – jedná se o hodnotu vycházející z katalogového údaje momentové konstanty motoru a dále z průměru kola, aktuální průměr odvalování kola se může měnit velmi málo, aktuální momentová konstanta motorů je však závislá na teplotě permanentních magnetů a s teplotou klesá
- odpor statorového vinutí motoru R_M ve studeném stavu je výrobcem udáván $0,24 \Omega$, tuto velikost odporu budeme používat ve výpočtech
- počáteční a konečná rychlost rozjezdu v_1 a v_2
- hmotnost vozidla m – je uvažována 2200 kg včetně posádky
- sklon trati s , ze kterého se určí síla odporu ze stoupání podle vztahu $F_S = m \cdot g \cdot s$, kde m je hmotnost vozidla, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ je gravitační zrychlení a s je sklon trati
- konstantní síla jízdních odporů vozidla F_K – tato hodnota byla zjištěna experimentálně přepočtem střední hodnoty momentotvorné složky proudu na

tažnou sílu při jízdě experimentálního vozidla konstantní rychlostí po rovné trati. Při těchto měřeních byly pro jednotlivé rychlosti naměřeny následující hodnoty:

Rychlost v [km/h]	5	10	15	18	20
F_K [N]	123	126	149	167	184

Tabulka 4 Výsledky měření jízdních odporů na experimentálním vozidle, zdroj [4]



Obrázek 4 Graf výsledku měření jízdních odporů F_K , zdroj [4]

Z tabulky 4 a obrázku 4 je zřejmé, že ani při rychlosti do 20 km/h nejsou jízdní odpory experimentálního vozidla zcela konstantní. Vzhledem k tomu, že výše uvedené odvození energeticky optimální tažné síly pro rozjezd F_t předpokládá pouze konstantní jízdní odpory F_K a vzhledem k tomu, že zkoušky probíhají převážně do rychlosti 15 km/h, bylo pro analytický výpočet zavedeno zjednodušení, kdy je uvažován konstantní jízdní odpor F_K daný střední hodnotou naměřených bodů na obrázku 4, tedy je uvažována hodnota $F_K = 150$ N. V souladu s rovnicí (4) lze psát:

$$F_K = F_{MECH} + F_{FE} \quad (21)$$

Co se týká řešení za pomoci numerických výpočtů pomůže nám naměřená křivka jízdních odporů k tomu, abychom zvolili vhodně absolutní člen jízdních odporů, který byl námi stanoven na velikost $F = 133,54$ N z proložení křivky na obrázku 4 v programu MS Excel.

Při zohlednění odporu vzduchu, tak bereme zde v potaz pouze kvadratický člen a ten lineární zanedbáme. K velikosti části jízdních odporů, které závisí na rychlosti kvadraticky jsme došli za pomoci tohoto vzorce:

$$F = S \cdot c_x \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (22)$$

Ve vzorci (22) S představuje plochu danou čelem experimentálního vozíku a přesahující částí trakčního rozvaděče. Pokud jde o konstantu c_x je to konstanta zohledňující tvar čela vozíku, ρ je měrná hustota vzduchu a v je rychlost. V našem případě je $S = 2 \text{ m}^2$, $c_x = 1$, $\rho = 1,29 \text{ kg/m}^3$ a v je proměnná, která se bude měnit v čase s jak bude vozík zrychlovat.

Z toho nám plyne, že pro jízdní odpory experimentálního vozítka platí vztah:

$$F_K = 133,54 + 1,29v^2 \quad (23)$$

Tento vztah pro jízdní odpory použijeme tedy při numerickém řešení, což nám zapříčiní nekonstantní zrychlení a . Je to dáno tím, že zde již neuvažujeme $F_{vzd} = 0$, ale jako kvadraticky rostoucí složku odporu kladoucí nároky na celkový výkon.

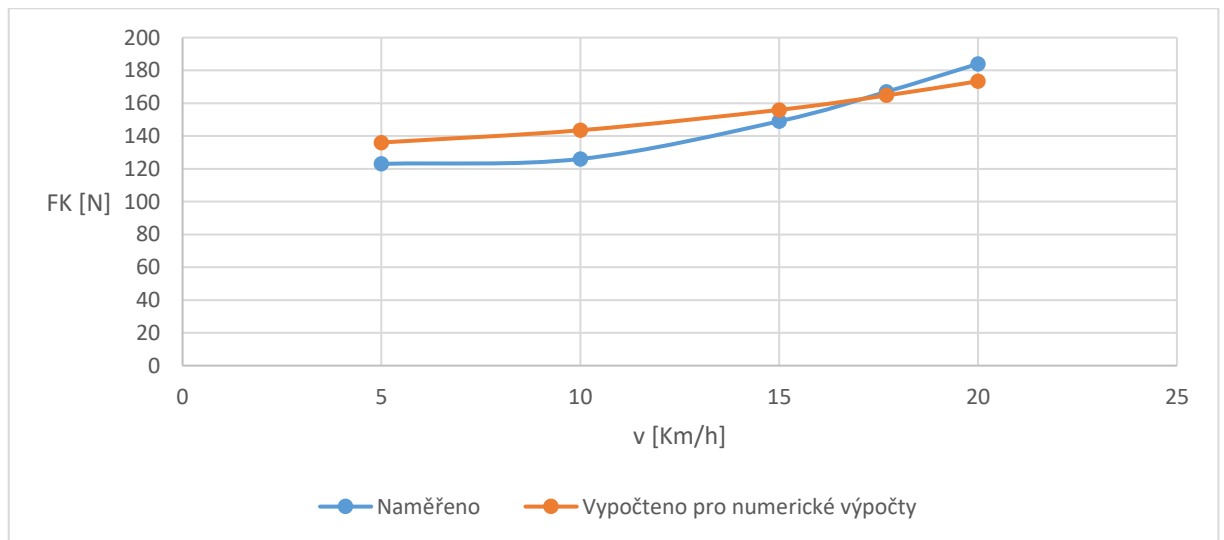
Pro názornost dokládám, zde vytvořený průběh závislosti jízdních odporů spočtený podle vzorce (23) a vnesený do jednoho grafu s naměřenými hodnotami jízdních odporů při totožných rychlostech spolu s tabulkami na základě kterých tyto průběhy vznikly.

Naměřeno					
v [Km/h]	5	10	15	17,7	20
F_K [N]	123	126	149	167	184

Tabulka 5 Tabulka s naměřenými reálnými hodnotami F_K

Vypočteno ze vzorce (24)					
v [Km/h]	5	10	15	17,7	20
F_K [N]	136,0284	143,4937	155,9358	164,724	173,3548

Tabulka 6 Tabulka s vypočtenými hodnotami F_K



Obrázek 5 Graf vypočtených a naměřených hodnot jízdních odporů F_K

Při numerické výpočtu postupujeme tak, že každou desetinu sekundy odebíráme vzorek hodnot následujících veličin: rychlost v a to, jak v m/s tak i Km/h, okamžitý potřebný výkon P . Jednou za sekundu zjistíme i hodnotu aktuálního zrychlení a . Tyto hodnoty vypočítáme podle následujících vzorců:

$$F_t = F_z + m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (24)$$

Z tohoto zjednodušeného tvaru pohybové rovnice, kde je zanedbán součinitel točivých hmot m_{rk} odvodíme matematickými úpravami vzorec pro výpočet aktuální rychlosti v daném čase, přičemž musíme uvažovat F_z , jako naší měnící se proměnou velikost jízdních odporů F_K .

$$v_2 = \frac{(F_t - F_z)}{m} \cdot \Delta t + v_1 \quad (25)$$

Tento vzorec (25) vznikl vyjádřením Δv z pohybové rovnice a přičtením v_1 , což je rychlost dosažená v předcházejícím časovém úseku. Rychlost v_2 obsažená v tomto vzorci představuje rychlost dosaženou v tomto časovém úseku, F_t je procentuální tažná síla, kterou disponujeme na překonání jízdních odporů a zrychlení vozidla, F_z jsou již zmíněné jízdní odpory F_K , m je hmotnost vozidla včetně baterií a Δt je daný časový úsek.

Zrychlení a potom můžeme zjistit jako rozdíl dvou rychlostí v_x a v_y , které uvažujeme jako rychlosti odebrané po intervalu desetinásobku Δt tedy jedné sekundě.

$$a = v_x - v_y \quad (26)$$

Rychlost v_x je bráno jako rychlost naměřená o sekundu později než rychlost v_y .

V některých případech může situaci rozjezdu komplikovat sklon. Jeho zohlednění jako takového jakožto i jeho velikosti provedeme podle následujícího vztahu:

$$F_s = \left(\frac{m}{1000}\right) \cdot s \cdot g \quad (27)$$

Velikost této síly F_s zohledníme při numerickém výpočtu tak, že jí přičteme k aktuální hodnotě jízdních odporů F_K . Malé m v tomto vzorečku představuje hmotnost i s bateriemi, s je sklon v ‰ a g tíhové zrychlení jehož velikost je $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.

$$P = F_t \cdot v \quad (28)$$

Tento vzorec (28) je použit pro zjištění hodnoty aktuálního výkonu P a po jeho drobné úpravě můžeme stanovit požadavky na odběr energie v daném časovém úseku Δt .

$$W_{\Delta t} = F_t \cdot v \cdot \Delta t \quad (29)$$

Pomocí tohoto vzorce (29) určíme požadavky na energii $W_{\Delta t}$ v daném časovém úseku. Přičemž F_t je procentuální tažná síla, v je aktuální rychlost a Δt je již mnohokrát zmíněný úsek o velikosti 0,1s.

Celkovou energii bez zohlednění Joulových ztrát můžeme, pak zapsat pomocí následujícího vztahu:

$$W_{Kol} = \sum_{v_1}^{v_2} W_{\Delta t} \quad (30)$$

Složku navyšující celkový požadavek na výkon a zohledňující Joulovy ztráty spočteme dle následujícího vzorečku:

$$P_J = 4 \cdot 3 \cdot R_M \cdot \left(\frac{F_t}{K_R}\right)^2 \quad (31)$$

P_J je tedy výkon Joulových ztrát, součin $4 \cdot 3$ zohledňuje fakt, že se jedná o seskupení čtyř třífázových trakčních pohonů. R_M je odpor fáze statorového vinutí, který je u experimentálního vozidla $0,24 \Omega$ a K_R je konstanta úměrnosti mezi proudem motoru a celkovou tažnou silou pro tento případ platí $K_R = 50,4 \text{ N/A}$.

Celkovou energii potřebnou na krytí Joulových ztrát poté spočteme, jako sumu výkonů P_J v daném časovém úseku podle vzorce:

$$W_J = \sum_{v_1}^{v_2} P_J \cdot \Delta t \quad (32)$$

W_J je tedy energie potřebná na krytí Joulových ztrát, P_J je již zmiňovaný výkon připadající Joulovým ztrátám a Δt tentokrát není čas rovný $0,1 \text{ s}$, ale rozdíl času branného od počátku rozjezdu do okamžiku dosažení rychlosti v_2 bez času branného od počátku rozjezdu do okamžiku dosažení rychlosti v_1 .

Posledním krokem pro určení numerickými výpočty hodnoty proměnné W_{apoh} je sečíst W_{Kol} a W_J . Čímž budeme znát pro zadanou hodnotu F_t danou hodnotu W_{apoh} a to nám umožňuje sestavit numericky spočtenou křivku závislosti požadavku energie na tažné síle.

$$W_{apoh} = W_{Kol} + W_J \quad (33)$$

Nyní, když byly popsány oba přístupy ke spočtení závislosti energie na tažné síle může se přejít v této části k samotné analýze a zhodnocení výsledků získaných, jak analytickou metodou, tak numerickou metodou. Budeme se zabývat hledáním energetického minima oběma metodami, jejich případnou shodou, či neshodou, a to při různých velikostech sklonu trati.

0-16 Km/h analyticky bez sklonu trati											
$F_t [n\% \cdot F_{tmax}]$	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
$F_t [N]$	214,65	286,2	357,75	429,3	500,85	572,4	643,95	715,5	787,05	858,6	930,15
$W [J]$	80042,9913	52325,39583	44246,28142	40712,92	38944,21168	38043,42	37633,39	37527,84	37624,17	37861,23	38200,31
$W [Wh]$	22,2341643	14,53483217	12,29063373	11,30914	10,81783658	10,56762	10,45372	10,4244	10,45116	10,51701	10,6112

Tabulka 7 První část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu

0-16 Km/h analyticky bez sklonu trati											
$F_t [n\% \cdot F_{tmax}]$	70	75	80	85	90	95	100	125	150	200	300
$F_t [N]$	1001,7	1073,25	1144,8	1216,35	1287,9	1359,45	1431	1788,75	2146,5	2862	4293
$W [J]$	38615,68	39089,61	39609,47	40166,01	40752,31	41363,1	41994,25	45362,29	48944,62	56412,94	71830,02
$W [Wh]$	10,72658	10,85823	11,00263	11,15723	11,32009	11,48975	11,66507	12,60064	13,59573	15,67026	19,95278

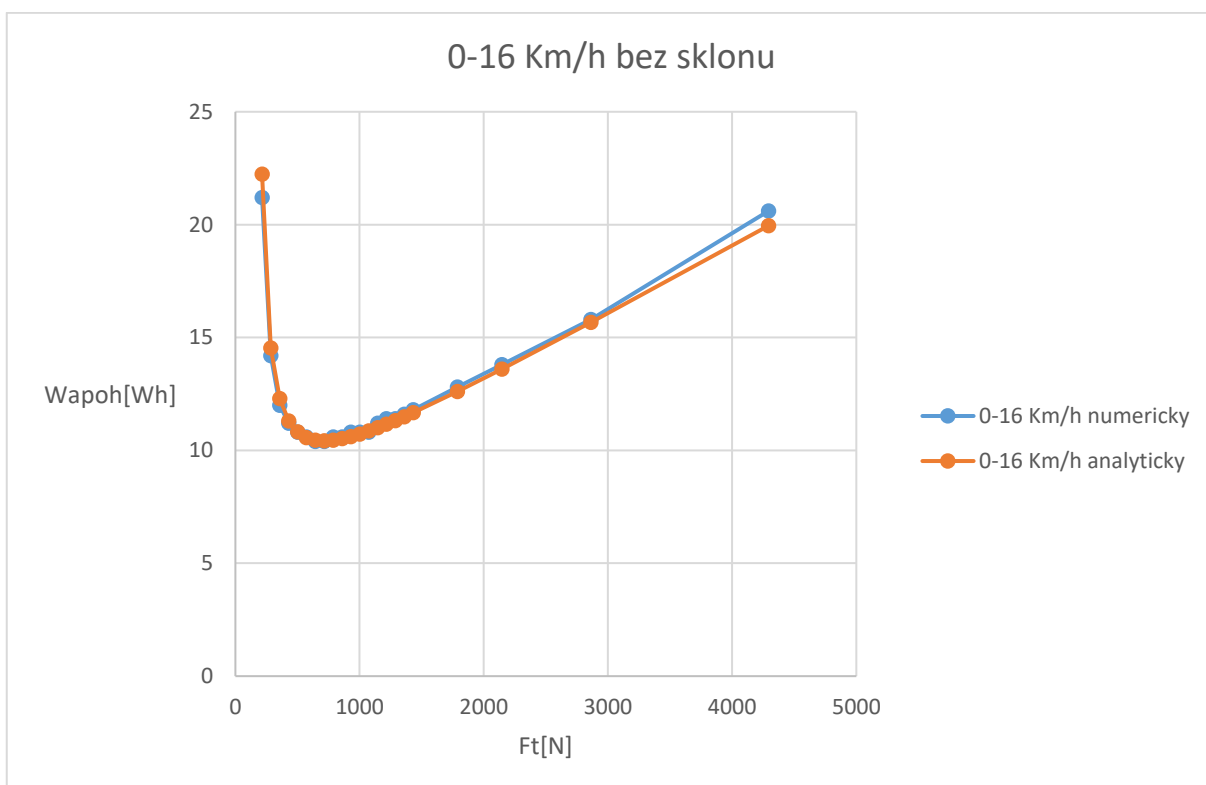
Tabulka 8 Druhá část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu

0-16 Km/h numericky bez sklonu trati											
Ft [n%*F _{tmax}]	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Ft [N]	214,65	286,2	357,75	429,3	500,85	572,4	643,95	715,5	787,05	858,6	930,15
W [Wh]	21,1757542	14,18421809	12,08282061	11,18839	10,74108768	10,55065	10,41015	10,43128	10,63136	10,56694	10,73351

Tabulka 9 První část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu

0-16 Km/h numericky bez sklonu trati											
Ft [n%*F _{tmax}]	70	75	80	85	90	95	100	125	150	200	300
Ft [N]	1001,7	1073,25	1144,8	1216,35	1287,9	1359,45	1431	1788,75	2146,5	2862	4293
W [Wh]	10,76462	10,86356	11,10574	11,37254	11,48877	11,67823	11,73835	12,86957	13,78	15,84343	20,68731

Tabulka 10 Druhá část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu



Obrázek 6 Graf zjištěných závislostí energie na rozjezd vozidla z 0 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu

Z průběhů na **obrázku 6** je patrné, že extrém energetického minima se nenachází v bodě odpovídajícím na ose x maximální tažné síle, ale zhruba v jeho polovině $F_t = 643,95$ N. Pokud bychom posuzovali průběh závislosti spočítaný numericky (modrý) a porovnávali ho s analytickým (oranžový) došli bychom k závěru, že jsou takřka totožné a že v tomto případě je vzoreček zjištěný analytickou metodou použitelný, a to i přes ten fakt, že zanedbává odpor vzduchu. Toto lze říci i přes to, že při numerickém výpočtu nám extrém vychází v bodě odpovídající 45 % maximální tažné síly F_t , zatímco při analytickém je v bodě odpovídajícímu 50 % tažné síly F_t neboť energie potřebná pro oba body je takřka totožná.

0-8 Km/h analyticky bez sklonu trati											
$F_t [n\% \cdot F_{tmax}]$	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
$F_t [N]$	214,65	286,2	357,75	429,3	500,85	572,4	643,95	715,5	787,05	858,6	930,15
$W [J]$	21985,9195	14748,11152	12768,94898	12007,01	11717,60486	11660,6	11735,01	11890,95	12100,94	12348,62	12623,62
$W [Wh]$	6,10719985	4,096697645	3,546930271	3,335281	3,25489024	3,239056	3,259724	3,303041	3,361373	3,430173	3,506561

Tabulka 11 První část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 8 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu

0-8 Km/h analyticky bez sklonu trati											
$F_t [n\% \cdot F_{tmax}]$	70	75	80	85	90	95	100	125	150	200	300
$F_t [N]$	1001,7	1073,25	1144,8	1216,35	1287,9	1359,45	1431	1788,75	2146,5	2862	4293
$W [J]$	12919,05	13230,16	13553,56	13886,79	14227,99	14575,74	14928,95	16751,83	18632,09	22473,92	30286,24
$W [Wh]$	3,588624	3,675044	3,764879	3,857442	3,952219	4,048817	4,146931	4,653286	5,175581	6,242756	8,412843

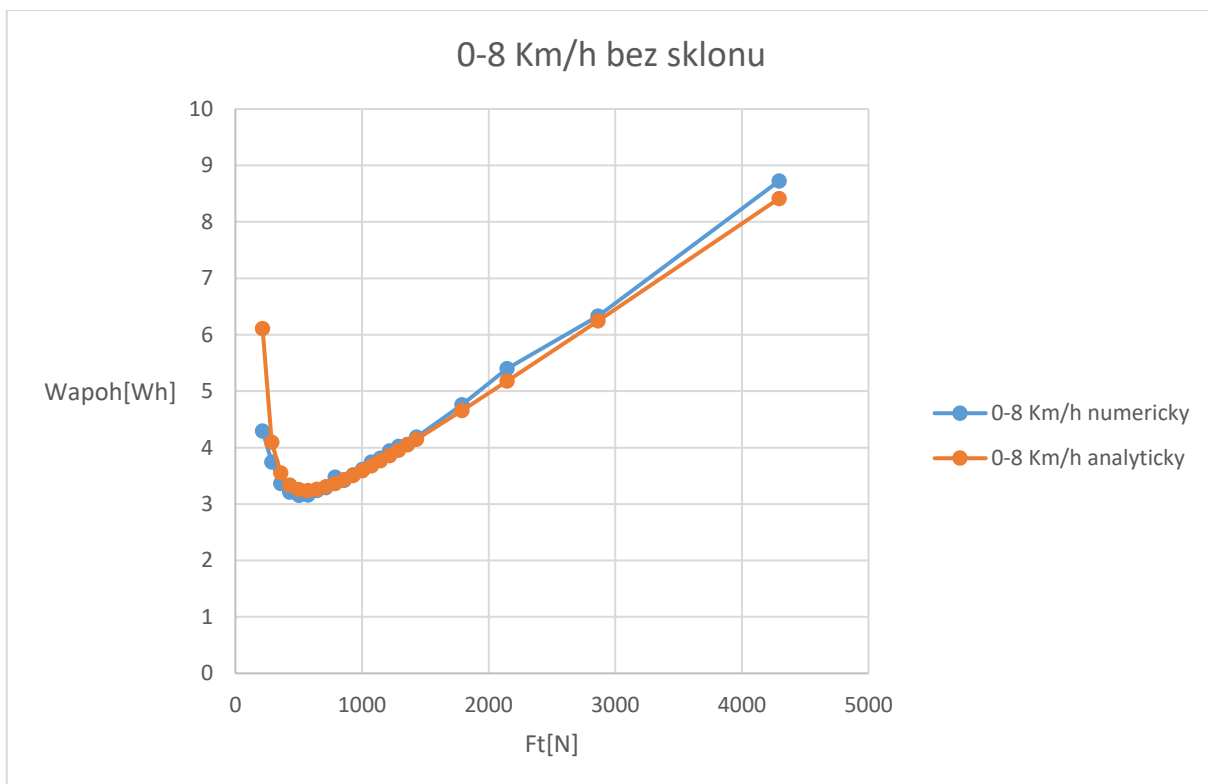
Tabulka 12 Druhá část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 8 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu

0-8 Km/h numericky bez sklonu trati											
$F_t [n\% \cdot F_{tmax}]$	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
$F_t [N]$	214,65	286,2	357,75	429,3	500,85	572,4	643,95	715,5	787,05	858,6	930,15
$W [Wh]$	4,29083878	3,740173483	3,363279952	3,21008	3,15354958	3,157947	3,235126	3,288535	3,477438	3,420102	3,514094

Tabulka 13 První část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 8 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu

0-8 Km/h numericky bez sklonu trati											
$F_t [n\% \cdot F_{tmax}]$	70	75	80	85	90	95	100	125	150	200	300
$F_t [N]$	1001,7	1073,25	1144,8	1216,35	1287,9	1359,45	1431	1788,75	2146,5	2862	4293
$W [Wh]$	3,614077	3,742841	3,811211	3,939292	4,020407	4,052192	4,186411	4,760291	5,399807	6,328826	8,723345

Tabulka 14 Druhá část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 8 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu



Obrázek 7 Graf zjištěných závislostí energie na rozjezd vozidla z 0 na 8 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu

Z průběhů na grafu, jemuž odpovídá **obrázek 7** je vidět, že extrém energetického minima se nenachází v bodě odpovídající na ose x maximální tažné síle, ale ve 35 % maximální tažné síly $F_t = 500,85$ N. Po porovnání naměřených hodnot docházíme k závěru, že je analytický vzorec použitelný. Sice podle něj vychází minimum v 40 % maximální tažné síly F_t , ale při bližším pohledu se zdají být tyto rozdíly malé v porovnání s energií požadovanou při maximální tažné síle $F_t = 1431$ N. Lze říci, že křivka analyticky spočtená (oranžová) poměrně přesně kopíruje tu vypočtenou numericky (modrou).

8-16 Km/h analyticky bez sklonu											
F_t [n%* F_{tmax}]	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
F_t [N]	214,65	286,2	357,75	429,3	500,85	572,4	643,95	715,5	787,05	858,6	930,15
W [J]	58057,0718	37577,28431	31477,33245	28705,9	27226,60681	26382,82	25898,38	25636,89	25523,23	25512,61	25576,69
W [Wh]	16,1269644	10,43813453	8,743703458	7,973862	7,562946337	7,328562	7,193996	7,121359	7,089786	7,086836	7,104635

Tabulka 15 První část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 8 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu

8-16 Km/h analyticky bez sklonu											
F_t [n%* F_{tmax}]	70	75	80	85	90	95	100	125	150	200	300
F_t [N]	1001,7	1073,25	1144,8	1216,35	1287,9	1359,45	1431	1788,75	2146,5	2862	4293
W [J]	25696,63	25859,46	26055,91	26279,22	26524,32	26787,35	27065,3	28610,46	30312,53	33939,02	41543,78
W [Wh]	7,137953	7,183182	7,237752	7,299783	7,367868	7,440931	7,51814	7,947351	8,420148	9,427505	11,53994

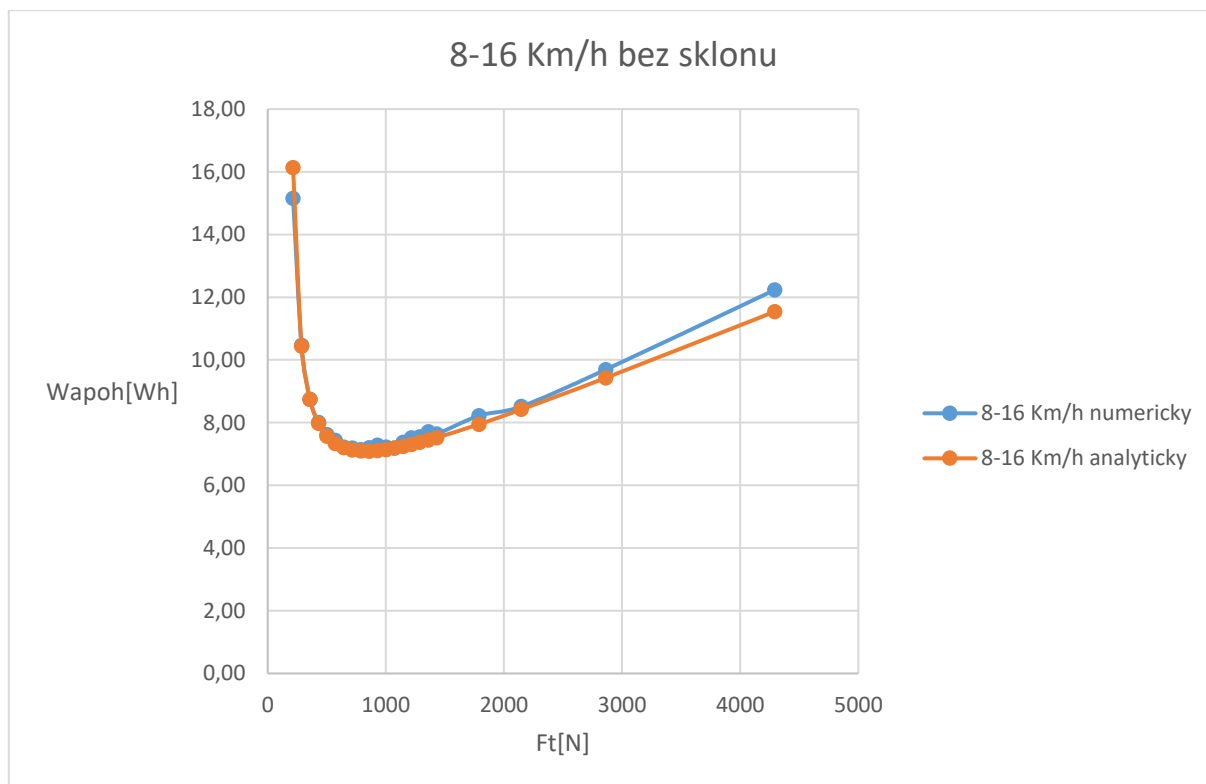
Tabulka 16 Druhá část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 8 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu

8-16 Km/h numericky bez sklonu trati											
F_t [n%* F_{tmax}]	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
F_t [N]	214,65	286,2	357,75	429,3	500,85	572,4	643,95	715,5	787,05	858,6	930,15
W [Wh]	15,15	10,46	8,74	8,00	7,62	7,43	7,22	7,19	7,14	7,20	7,28

Tabulka 17 První část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 8 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu

8-16 Km/h numericky bez sklonu trati											
F_t [n%* F_{tmax}]	70	75	80	85	90	95	100	125	150	200	300
F_t [N]	1001,7	1073,25	1144,8	1216,35	1287,9	1359,45	1431	1788,75	2146,5	2862	4293
W [Wh]	7,21	7,19	7,37	7,51	7,55	7,71	7,64	8,22	8,52	9,69	12,23

Tabulka 18 Druhá část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 8 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu



Obrázek 8 Graf zjištěných závislostí energie na rozjezd vozidla z 8 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu

Při pohledu na průběh obou závislostí na **obrázku 8** spatřujeme, že extrém se nenachází v maximu tažné síly, ale v 55 % maximální tažné síly F_t . Bod F_t , kterému odpovídá minimum je roven velikosti tažné síly $F_t = 787,05$ N. Při porovnání s předchozím grafem zjišťujeme očekávatelný fakt, že zrychlení o 8 Km/h je energeticky náročnější při zrychlování z 8 na 16 Km/h, než z 0 na 8 Km/h. Také můžeme pozorovat posunutí extrému z 35 % na 55 %.

0-16 Km/h analyticky se sklonem 12‰								
F_t [n%* F_{tmax}]	35	40	45	50	55	60	65	70
F_t [N]	500,85	572,4	643,95	715,5	787,05	858,6	930,15	1001,7
W [J]	148733,7717	98335,18	79113,64	69236,16776	63397,6	59669,74	57183,26	55488,59
W [Wh]	41,31493657	27,31533	21,97601	19,23226882	17,61045	16,57493	15,88424	15,4135

Tabulka 19 První část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 12‰

0-16 Km/h analyticky se sklonem 12‰										
F_t [n%* F_{tmax}]	75	80	85	90	95	100	125	150	200	300
F_t [N]	1073,25	1144,8	1216,35	1287,9	1359,45	1431	1788,75	2146,5	2862	4293
W [J]	54329,87	53550,76	53050,32	52760,51	52633,76	52635,81	53876,86	56240,02	62368,89	76619,6
W [Wh]	15,09163	14,87521	14,7362	14,6557	14,62049	14,62106	14,96579	15,62223	17,32469	21,28322

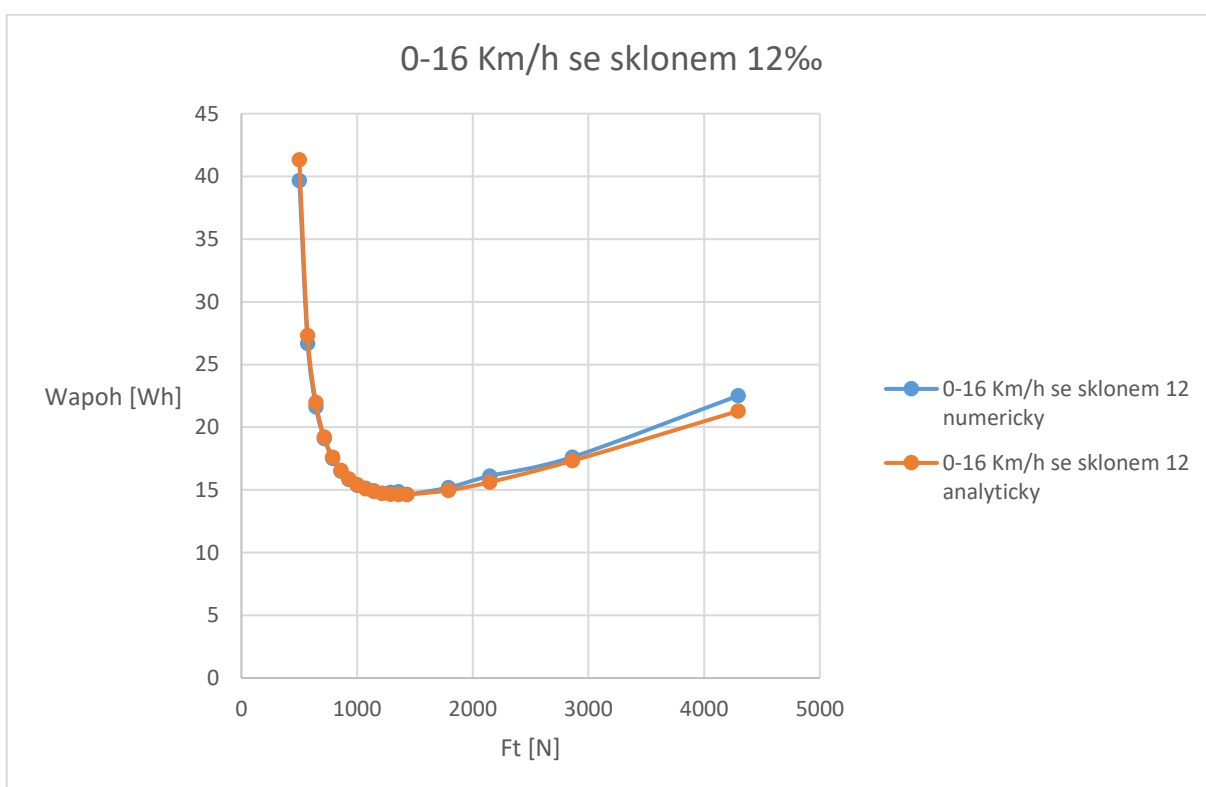
Tabulka 20 Druhá část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 12‰

0-16 Km/h numericky a sklon 12‰								
Ft [n%*F _{tmax}]	35	40	45	50	55	60	65	70
Ft [N]	500,85	572,4	643,95	715,5	787,05	858,6	930,15	1001,7
W [Wh]	39,672534	26,67282	21,6119	19,08336611	17,51166	16,48412	15,81702	15,37633

Tabulka 21 První část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 12‰

0-16 Km/h numericky a sklon 12‰										
Ft [n%*F _{tmax}]	75	80	85	90	95	100	125	150	200	300
Ft [N]	1073,25	1144,8	1216,35	1287,9	1359,45	1431	1788,75	2146,5	2862	4293
W [Wh]	15,13263	14,93869	14,72943	14,80541	14,84461	14,64785	15,19001	16,1095	17,62379	22,50383

Tabulka 22 Druhá část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 12‰



Obrázek 9 Graf zjištěných závislostí energie na rozjezd vozidla z 0 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 12‰

Z tohoto grafu na **obrázku 9** je patrné, že přidání sklonu o velikosti 12 ‰ ovlivnilo polohu extrému energetického minima a jeho velikost. Extrém se posunul takřka do bodu, kdy F_t je rovno F_t maximální a energie potřebná narostla z 10,41 na 14,64 Wh, což znamená nárůst o 4,23 Wh.

Pokud bychom se měli zaobírat přesností analytického výpočtu lze říci, že pro tento případ se příliš, co do velikosti hodnot od numerického příliš neliší a obě křivky se takřka překrývají.

0-16 Km/h analyticky se sklonem 24‰							
$F_t [n\% \cdot F_{tmax}]$	55	60	65	70	75	80	85
$F_t [N]$	787,05	858,6	930,15	1001,7	1073,25	1144,8	1216,35
$W [J]$	201277,1	140734,3479	113669	98549,06	89047,84	82636,03	78104,36
$W [Wh]$	55,9103	39,09287441	31,57473	27,37474	24,73551	22,95445	21,69566

Tabulka 23 První část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 24‰

0-16 Km/h analyticky se sklonem 24‰							
$F_t [n\% \cdot F_{tmax}]$	90	95	100	125	150	200	300
$F_t [N]$	1287,9	1359,45	1431	1788,75	2146,5	2862	4293
$W [J]$	74801,85	72346,92	70501,16	66326,42	66091,19	69730,93	82093,55
$W [Wh]$	20,77829	20,09637	19,58365	18,42401	18,35866	19,3697	22,80376

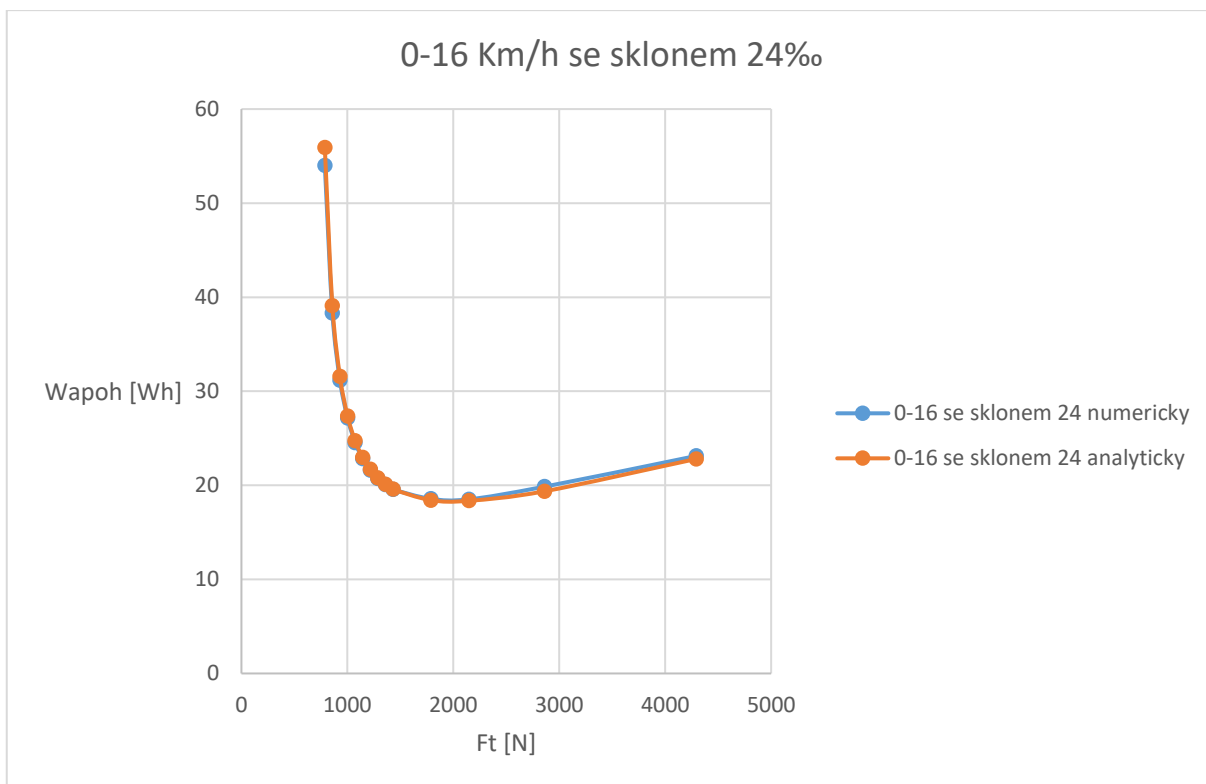
Tabulka 24 Druhá část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 24‰

0-16 Km/h numericky se sklonem 24‰							
$F_t [n\% \cdot F_{tmax}]$	55	60	65	70	75	80	85
$F_t [N]$	787,05	858,6	930,15	1001,7	1073,25	1144,8	1216,35
$W [Wh]$	54,00475	38,32476483	31,16808	27,1452	24,54975	22,82859	21,60959

Tabulka 25 První část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 24‰

0-16 Km/h numericky se sklonem 24‰							
$F_t [n\% \cdot F_{tmax}]$	90	95	100	125	150	200	300
$F_t [N]$	1287,9	1359,45	1431	1788,75	2146,5	2862	4293
$W [Wh]$	20,73645	20,06961	19,57513	18,56215	18,51016	19,86009	23,12435

Tabulka 26 Druhá část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 24‰



Obrázek 10 Graf zjištěných závislostí energie na rozjezd vozidla z 0 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 24‰

Na tomto grafu – **obrázek 10** – je takřka naprostá shoda mezi křivkou spočtenou analyticky a numericky. Je to dáno tím, že při sklonu 24 ‰ je vliv síly F_s , tak výrazný, že naprosto převyšuje vliv síly F_{vzd} . Dále zde stojí za povšimnutí, že extrém se zde nachází v bodě odpovídajícímu $1,5 \cdot F_{tmax}$, což nám jednoznačně říká, že v takovýchto případech velkého sklonu trati se vždy vyplatí rozjíždět maximálním možným tahem F_t .

8-16 Km/h analyticky se sklonem 24‰							
F_t [n%* F_{tmax}]	55	60	65	70	75	80	85
F_t [N]	787,05	858,6	930,15	1001,7	1073,25	1144,8	1216,35
W [J]	136541	94833,16076	76106,11	65579,03	58908,96	54359,64	51100,96
W [Wh]	37,92805	26,34254466	21,14058	18,2164	16,3636	15,0999	14,19471

Tabulka 27 První část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 8 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 24‰

8-16 Km/h analyticky se sklonem 24‰							
F_t [n%* F_{tmax}]	90	95	100	125	150	200	300
F_t [N]	1287,9	1359,45	1431	1788,75	2146,5	2862	4293
W [J]	48686,03	46852,94	45438,01	41832,75	40931,8	41951,35	47479,82
W [Wh]	13,5239	13,01471	12,62167	11,62021	11,36994	11,65315	13,18884

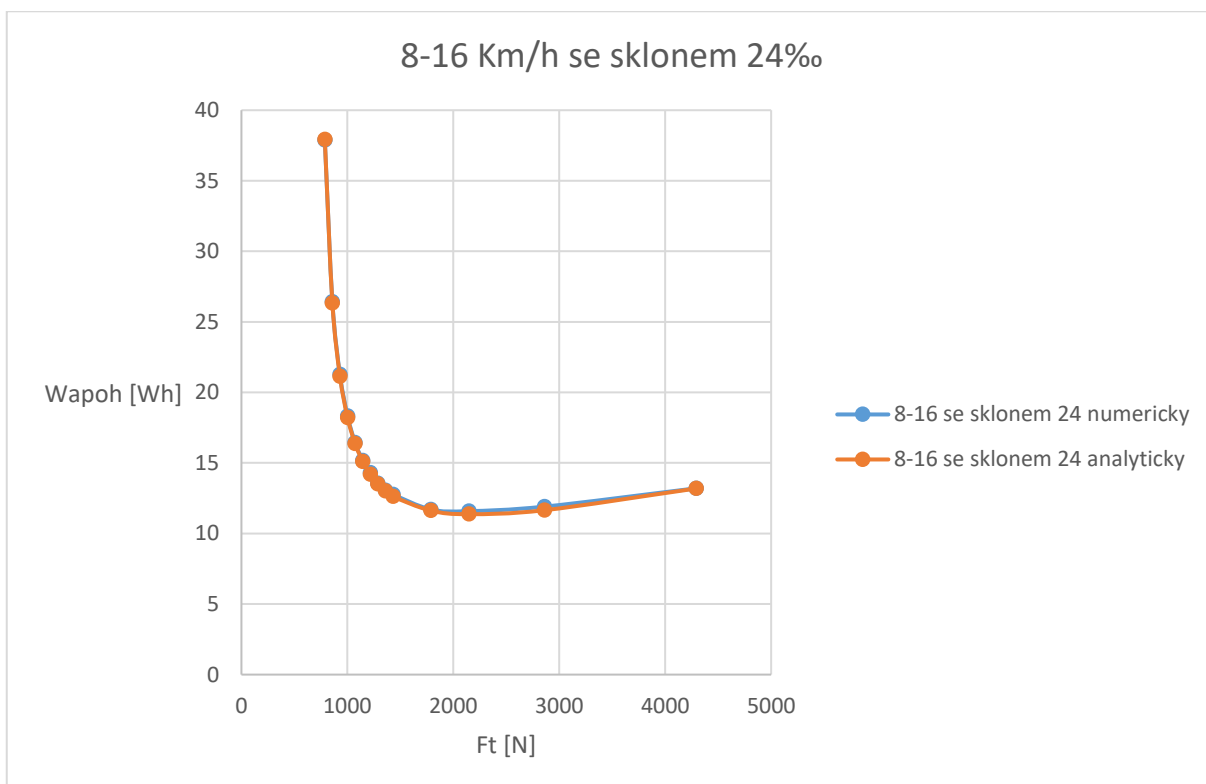
Tabulka 28 Druhá část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 8 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 24‰

8-16 Km/h numericky se sklonem 24‰							
Ft [n%*Ftmax]	55	60	65	70	75	80	85
Ft [N]	787,05	858,6	930,15	1001,7	1073,25	1144,8	1216,35
W [Wh]	37,87057	26,42	21,27	18,33	16,44	15,18	14,32

Tabulka 29 První část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 8 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 24‰

8-16 Km/h numericky se sklonem 24‰							
Ft [n%*Ftmax]	90	95	100	125	150	200	300
Ft [N]	1287,9	1359,45	1431	1788,75	2146,5	2862	4293
W [Wh]	13,56	13,06	12,77	11,70	11,58	11,91	13,20

Tabulka 30 Druhá část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 8 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 24‰



Obrázek 11 Graf zjištěných závislostí energie na rozjezd vozidla z 8 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 24‰

U tohoto grafu – **obrázek 11** – stojí za zmínku fakt, že nám potvrzuje, že zrychlení o stejnou rychlost v rychlostech vyšších je energeticky náročnější, neboť extrém zde tvoří energetickou nadpoloviční většinu z výkonu požadovaného na zrychlení z 0 na 16 Km/h.

3 Návrh metodiky optimálního řízení aplikovaný na reálné kolejové vozidlo

3.1 Technické řešení a energetický řetězec reálného kolejového vozidla

Jako reálné vozidlo byl použit RegioPanter jednotka řady číslo 640 je částečně nízkopodlažní elektrická jednotka, kterou si objednaly v roce 2011 České dráhy a. s., výrobcem je Škoda Vagonka a. s.

Má tyto základní konstrukční parametry:

rozchod	1435 mm
uspořádání dvojkolí	Bo' 2' + Bo' 2' + 2' Bo'
délka	79 400 mm
šířka	2820 mm
výška	4260 mm
Hmotnost bez akumulátorových baterií	106 t
hmotnost včetně akumulátorových baterií	110,5 t
průměr kol	480 mm

Tabulka 31 Konstrukční parametry RegioPanteru, zdroj [5] a [6]

Návrh struktury elektrické výzbroje pro hybridizované jednotky ř. 440 resp. 640 byl proveden ve firmě ŠKODA TRANSPORTATION a.s. a vychází z původní koncepce těchto elektrických jednotek se snahou o minimalizaci úprav.

Blokové schéma elektrické výzbroje dvou vozové jednotky řady 640 s doplněnými akumulátory je na obrázku v příloze. Pro naše potřeby postačí prozatím důležitá informace, že se jedná o vozidlo poháněné čtyřmi asynchronními motory, což nás nutí přihlídnout k jeho trakční charakteristice, blíže si tento problém rozebereme v další části.

V této části je třeba uvést hlavní technická data hybridizované jednotky řady 640, jenž byla v této práci uvažována

Maximální trakční výkon při trolejovém napájení	1638kW
Trvalý trakční výkon při trolejovém napájení	1332kW
Maximální trakční výkon při akumulátorovém napájení	344kW
Maximální tažná síla při trolejovém napájení	132kN
Maximální tažná síla při akumulátorovém napájení	88kN
Maximální brzdňý výkon při trolejovém napájení	1470kW
Maximální brzdňý výkon při napájení z akumulátoru	425kW
Maximální brzdňá síla při napájení z troleje	105kN
Hmotnost jednotky ř. 640 bez akumulátorové výzbroje	106 t
Uvažovaná hmotnost jednotky ř. 640 s akumulátorovým napájením	110,5t
Uvažovaná adhezní hmotnost	55,25t
Součinitel rotujících hmot	1,045
Jízdní odpory	$0,752+0,0022v+0,0003v^2$
Plná elektrická brzda do	5 km/h
Maximální rychlost při trolejovém napájení	160 km/h

Maximální rychlost při akumulátorovém napájení	80 km/h
Jmenovitý výkon trakčního motoru	340kW
Jmenovitý příkon trakčního motoru	366,353kW
Jmenovitá účinnost trakčního motoru	0,928
Jmenovité napětí trakčního motoru	3x1728V
Jmenovitý proud trakčního motoru	142 A
Jmenovitý účinník trakčního motoru	0,862
Jmenovité otáčky trakčního motoru	1660 ot/min
Jmenovitá frekvence trakčního motoru	56,27Hz
Výkon pomocných spotřeb na jeden vůz (uvažovaný v simulacích)	40kW
Maximální výkon pomocných spotřeb na jeden vůz	50kW
Jmenovitý výkon nepřímého stejnosměrného měniče	3kV/600V120kVA
Uvažovaná účinnost trakčního měniče	0,98
Uvažovaná účinnost nepřímého stejnosměrného měniče	3kV/600V0,90
Uvažovaná účinnost trakční převodovky	0,98
Uvažovaná účinnost pulsního usměřovače (u jednotky ř. 640)	0,98
Jmenovitý proud tlumivky filtru dvojice trakčních střídačů	240 A
Maximální proud tlumivky filtru dvojice trakčních střídačů	300 A
Výkon trakčního transformátoru (u jednotky ř. 640)	1280kVA
Hmotnost trakčního transformátoru (u jednotky ř. 640)	2,5t
Hmotnost pulsního usměřovače (u jednotky ř. 640)	1,2t
Odporu rotorového vinutí přepočítaného na stator	0,0764Ω
Odpor statorového vinutí	0,1269Ω

Tabulka 32 Tabulka hlavních technických dat RegioPantera

Tyto hlavní technická data byla získána z práce: zdroj [5].

3.2 Zohlednění rozdílnosti složek kladoucích nároky na výkon a nastínění jejich řešení

Při analytickém výpočtu nejsme schopni všechny tyto rozdílnosti zohlednit za pomoci výrazu (20), jenž budeme používat, který je shodný s používaným výrazem v části s experimentálním vozidlem.

Na rozdíl od analytického výpočtu při výpočtu numerickém můžeme některé z těchto odlišností zohlednit ve výpočtech a jejich vliv, tak minimalizovat.

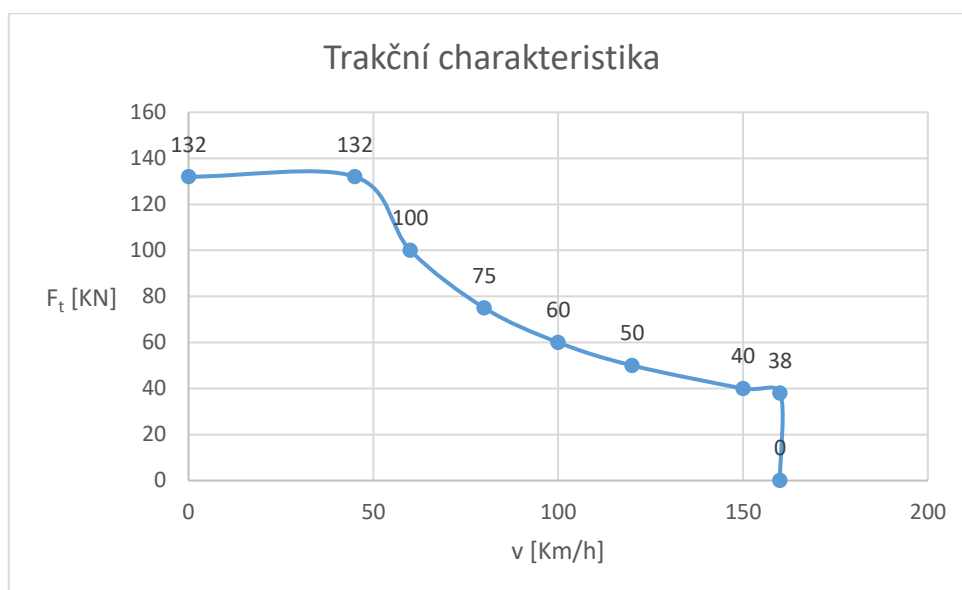
Jsou to tyto odlišnosti:

1. Odbuzení asynchronních motorů:

Na rozdíl od experimentálního vozítka, které bylo poháněno čtyřmi synchronními motory s permanentními magnety je RegioPanter poháněn asynchronními motory, což nás nutí vzít v potaz tvar trakční charakteristiky jednotky řady 640, kde je zohledněno odbuzení motoru, která má následující tvar:

F_t [kN]	132	132	100	75	60	50	40	38	0
v [km/h]	0	45	60	80	100	120	150	160	160

Tabulka 33 Tabulka hodnot zohledňující tvar trakční charakteristiky pro systémy 3kV DC a 25kV 50 Hz

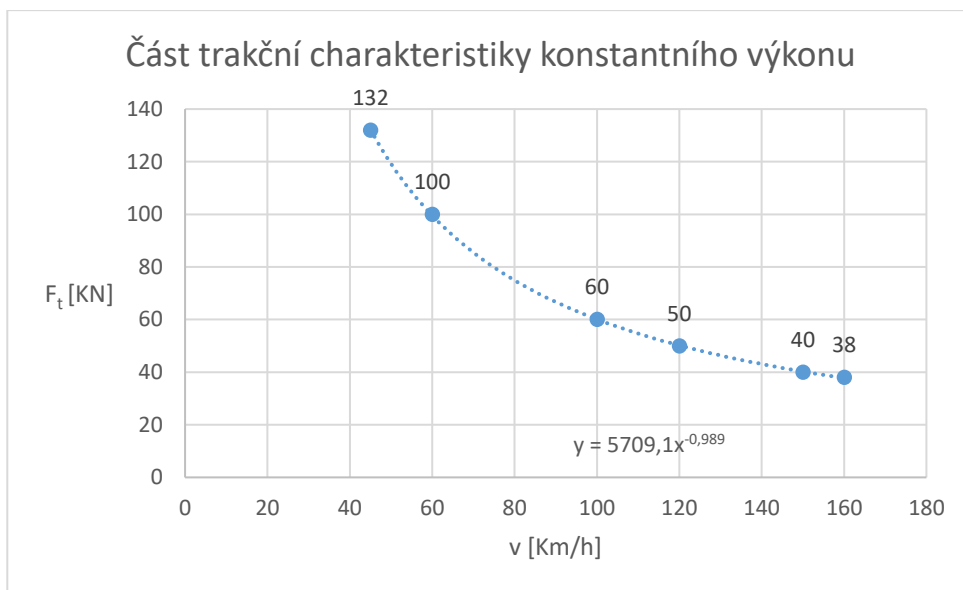


Obrázek 12 Graf zohledňující tvar celé trakční charakteristiky pro systémy 3kV DC a 25kV 50 Hz

Nás zajímá především část při rychlostech nad 45 km/h, kde se projevuje vliv odbuzení asynchronního motoru a dochází k poklesu tažné síly F_t .

F_t [kN]	132	100	60	50	40	38
v [km/h]	45	60	100	120	150	160

Tabulka 34 Tabulka zohledňující tvar trakční charakteristiky při rychlostech nad 45 km/h a konstantním výkonu



Obrázek 13 Graf zohledňující tvar trakční charakteristiky při rychlostech nad 45 Km/h a konstantním výkonu

Z obrázku číslo 12 je pro nás důležitý předpis mocninné funkce zohledňující tvar části trakční charakteristiky, jenž použijeme při numerických výpočtech v okamžiku, kdy RegioPanter překročí rychlost 45 Km/h.

$$F_t = 5709,1 \cdot v^{-0,989} \cdot 1000 \quad (34)$$

V tomto vzorci máme na výstupu jako závislou proměnou tažnou sílu F_t v KN a jako nezávislou proměnou rychlost v v Km/h. Podrobné zasazení do výpočtů bude popsáno v další části této práce.

Kompletní obrázek všech trakčních charakteristik bude přiložen v příloze této práce.

2. Vliv minimální magnetizační složky proudu I_0 :

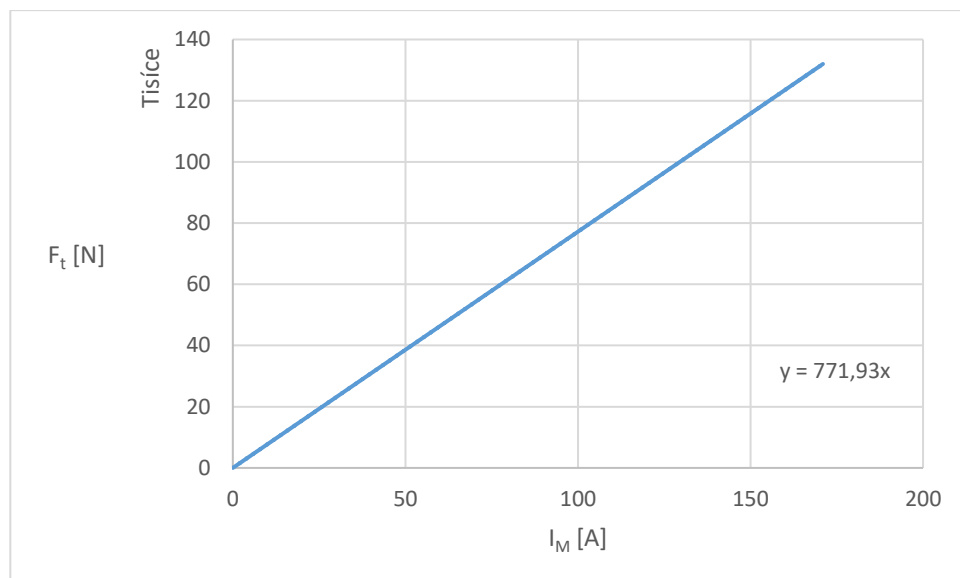
Jak vyplývá z obrázku číslo 2 i kdybychom uvažovali asynchronní motory s optimalizovaným magnetickým tokem a uvažovali lineární závislost tažné F_t síly na proudu bude nám zde vznikat chyba projevující se v Joulových ztrátách díky magnetizační složce proudu I_0 . Platí zde vztah:

$$P_J = R_M \cdot \left(\frac{F_t}{K_R} + I_0 \right)^2 \quad (35)$$

My vliv tohoto proudu zanedbáme a budeme uvažovat vztah pro P_J stejný jako u experimentálního vozítka:

$$P_J = R_M \cdot \left(\frac{F_t}{K_R} \right)^2 \quad (36)$$

Pro spočtení nové konstanty K_R budeme uvažovat lineární závislost mezi proudem motoru I a tažnou silou F_t :



Obrázek 14 Graf závislosti tažné síly a proudu motoru

Z tohoto grafu nám konstanta K_R vychází 771,93 N/A, což uplatníme společně s novou konstantou R_M při výpočtu Joulových ztrát.

Nová konstanta R_M je rovna:

$$R_{celk100} = (R_1 + R_{21}) \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) = (0,1269 + 0,0764) \cdot (1 + 0,004 \cdot (100 - 20)) = 0,2683\Omega \quad (37)$$

V tomto vzorečku je R_1 odpor statorového vnutí, R_{21} odpor rotorového vnutí přepočítaného na stator. Zároveň jsou v něm zohledněny reálné pracovní podmínky, a tak jsou odpory vnutí přepočteny na odpory při teplotě 100 °C, $\Delta\vartheta$ je přírůstek teploty a α je teplotní součinitel odporu pro měď.

3.3 Optimalizace jízdní trajektorie při rozjezdu reálného kolejového vozidla

V případě analyticky spočtené závislosti se pro nás nic nemění a postupujeme podle stejného výrazu jako v předchozím případě u experimentálního vozidla:

$$W_{apoh} = \frac{F_{SK} \cdot m}{2 \cdot (F_t - F_{SK})} \cdot (v_2^2 - v_1^2) + \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_2^2 - v_1^2) + 4 \cdot 3 \cdot R_M \cdot \frac{m}{F_t - F_{SK}} \cdot \left(\frac{F_t}{K_R}\right)^2 \cdot (v_2 - v_1) \quad (38)$$

V tomto případě počítáme, již se značnými rozdíly v energetické náročnosti na dosažení požadované rychlosti mezi numerickým a analytickým výpočtem, neboť budeme počítat s vyššími rychlostmi, kde se dá počítat s poměrně značnými silami F_{vzd} .

Abychom viděli, co nejasněji rozdíly mezi analyticky spočtenými křivkami a numericky spočtenými křivkami budeme v případě analytického výpočtu dosazovat pouze absolutní člen jízdních odporů.

Při numerických výpočtech budeme postupovat co do odebíraných hodnot stejně jako u v případě experimentálního vozítka, jen zde musíme brát ohled na odbuzování asynchronních motorů a dosazování jízdních odporů.

Jízdní odpory jsou uvedeny v jednotkách $\frac{N}{KN}$ a rychlost nedosazujeme v základních jednotkách m/s, ale v Km/h, což pro nás znamená, že jízdní odpory odpovídají vzorci:

$$F_K = (0,752 + 0,0022 \cdot v + 0,0003 \cdot v^2) \cdot (m \cdot g) \quad (39)$$

Po zohlednění dosazení jízdních odporů nám pro výpočet rychlosti v daných intervalech $\Delta t = 0,1s$ vychází vzorec pro část trakční charakteristiky, kde se nesetkáváme s odbuzením asynchronních motorů následující výraz:

$$v_2 = \frac{(F_t - (0,752 + 0,0022 \cdot v_1 + 0,0003 \cdot v_1^2))}{m \cdot m_{rk}} \cdot \Delta t + v_1 \quad (40)$$

V tomto vzorečku jsou veličiny uvedené stejného druhu jako v případě experimentálního vozítka, kde jsme postupovali podle vzorečku (25) krom veličiny m_{rk} , což je součinitel rotujících hmot uvedený v tabulce hlavních technických dat RegioPanteru. Součinitel rotujících hmot jsme v případě experimentálního vozítka zanedbávali.

Pro část trakční křivky, kde dochází k odbuzení a držení konstantního výkonu nám po dosazení výrazu (35) za F_t vychází vzoreček pro výpočet rychlosti následující:

$$v_2 = \frac{((5709,1 \cdot v_1^{-0,989} \cdot 1000) - (0,752 + 0,0022 \cdot v_1 + 0,0003 \cdot v_1^2))}{m \cdot m_{rk}} \cdot \Delta t + v_1 \quad (41)$$

Pro přechod mezi těmito výrazy (40) a (41) jsme v programu Microsoft Excel použili funkci: *když*, která sledovala stav rychlosti v Km/h a ve vhodný okamžik přešla z jednoho výrazu na druhý.

Podobně jako u výpočtu rychlosti budeme postupovat u výpočtu okamžité energie, kde musíme také zohlednit tvar trakční charakteristiky. To nás vede k závěru, že pro rychlosti do 45 Km/h platí pro výpočet okamžitého výkonu stejný vzorec pro RegioPantera i pro experimentální vozidlo a to tento:

$$P = F_t \cdot v \quad (42)$$

Od 45 Km/h výše platí upravený vzorec, kde dosadíme za F_t vzorec (34) a vyjde nám výraz:

$$P = (5709,1 \cdot v_1^{-0,989} \cdot 1000) \cdot v_1 \quad (43)$$

Ze tvaru výrazu (43) plyne, že vzorec pro požadavek energie v daném časovém úseku $\Delta t = 0,1s$ při rychlostech nad 45 Km/h odpovídá tvaru:

$$W_{\Delta t} = (5709,1 \cdot v_1^{-0,989} \cdot 1000) \cdot v_1 \cdot \Delta t \quad (44)$$

Další výpočty budou provedeny na stejné bázi jako byly provedeny v části pro experimentální vozidlo.

Nyní, když byly popsány oba přístupy ke spočtení závislosti energie na tažné síle může přejít se v této části k samotné analýze a zhodnocení výsledků získaných, jak analytickou metodou, tak numerickou metodou. Budeme se zabývat hledáním energetického minima oběma

metodami, jejich případnou shodou, či neshodou, a to při různých velikostech sklonu trati a požadovaných dosažených rychlostí vozidla.

0-45 Km/h analyticky bez sklonu (Fsk jako při v=0)											
$F_t [n\% \cdot F_{tmax}]$	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
$F_t [N]$	19800	26400	33000	39600	46200	52800	59400	66000	72600	79200	85800
$W [J]$	9157532	9111124,72	9103954	9115988	9138849	9168414	9202416	9239508	9278838	9319840	9362124
$W [Wh]$	2543,759	2530,86798	2528,876	2532,219	2538,569	2546,782	2556,227	2566,53	2577,455	2588,844	2600,59

Tabulka 35 První část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 45 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu

0-45 Km/h analyticky bez sklonu (Fsk jako při v=0)											
$F_t [n\% \cdot F_{tmax}]$	70	75	80	85	90	95	100	125	150	200	300
$F_t [N]$	92400	99000	105600	112200	118800	125400	132000	165000	198000	264000	396000
$W [J]$	9405414	9449507	9494250	9539529	9585253	9631352	9677769	9913283	10152407	10636055	11612323
$W [Wh]$	2612,615	2624,863	2637,292	2649,869	2662,57	2675,376	2688,269	2753,69	2820,113	2954,46	3225,645

Tabulka 36 Druhá část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 45 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu

0-45 Km/h numericky bez sklonu											
$F_t [n\% \cdot F_{tmax}]$	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
$F_t [N]$	19800	26400	33000	39600	46200	52800	59400	66000	72600	79200	85800
$W [Wh]$	2722,539	2697,89865	2689,35	2683,185	2684,765	2707,392	2709,604	2724,838	2725,026	2738,804	2764,057

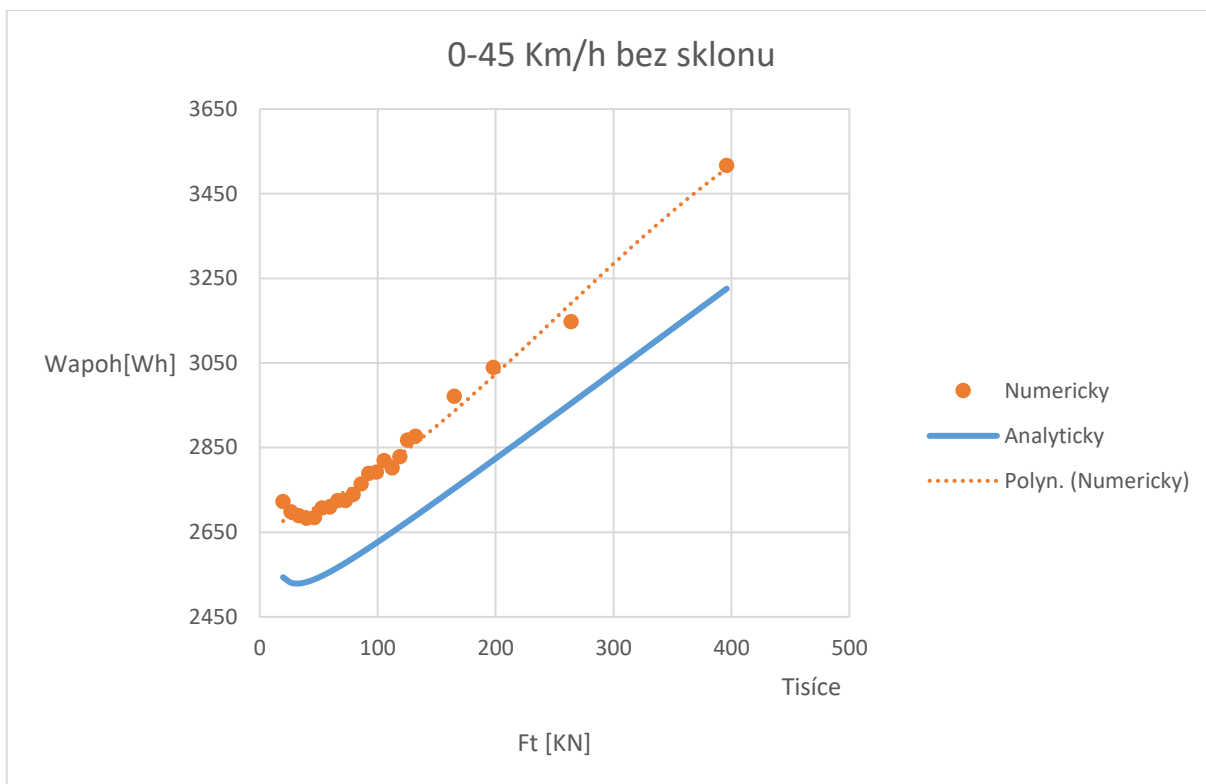
Tabulka 37 První část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 45 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu

0-45 Km/h numericky bez sklonu											
$F_t [n\% \cdot F_{tmax}]$	70	75	80	85	90	95	100	125	150	200	300
$F_t [N]$	92400	99000	105600	112200	118800	125400	132000	165000	198000	264000	396000
$W [Wh]$	2789,031	2792,092	2819,004	2802,21	2828,727	2867,403	2876,745	2971,346	3039,796	3147,943	3516,419

Tabulka 38 Druhá část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 45 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu

0-45 Km/h		
$F_t [n\% \cdot F_{tmax}]$	30	100
$F_t [N]$	39600	132000
$W [Wh]$	2683,19	2876,74487
$t [s]$	37,5	11,1

Tabulka 39 Tabulka odhalující rozdíly mezi volbou tažné síly v energetickém minimu a při maximální tažné síle



Obrázek 15 Graf zjištěných závislostí energie na rozjezd vozidla z 0 na 45 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu se zanedbáním 0 na vodorovné ose



Obrázek 16 Graf zjištěných závislostí energie na rozjezd vozidla z 0 na 45 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu

Z tabulek 35–39 vyplývá, že pro nižší rychlosti 0–45 Km/h v části trakční charakteristiky, kde nedochází k odbuzení asynchronních motorů je z energetického hlediska

mírně výhodné volit, nižší tažnou sílu o velikosti 30 % maximální možné tažné síly F_t , což se promítne do doby potřebné na rozjezd vozidla. Tato doba se dle tabulky 39 navýší z 11,1s na 37,5s. Pokud bychom se bavili o podobnosti analyticky spočtené křivky s tou numerickou dojdeme k závěru, že extrém vychází u té analyticky spočtené v bodě odpovídající tažné síle o 5 % nižší, než numerické s rozdílem necelých 155 Wh, což se dá považovat za poměrně přesné, kdy velkou část této odchyl lze přisoudit zohlednění konstanty m_{rk} v numerické výpočtu.

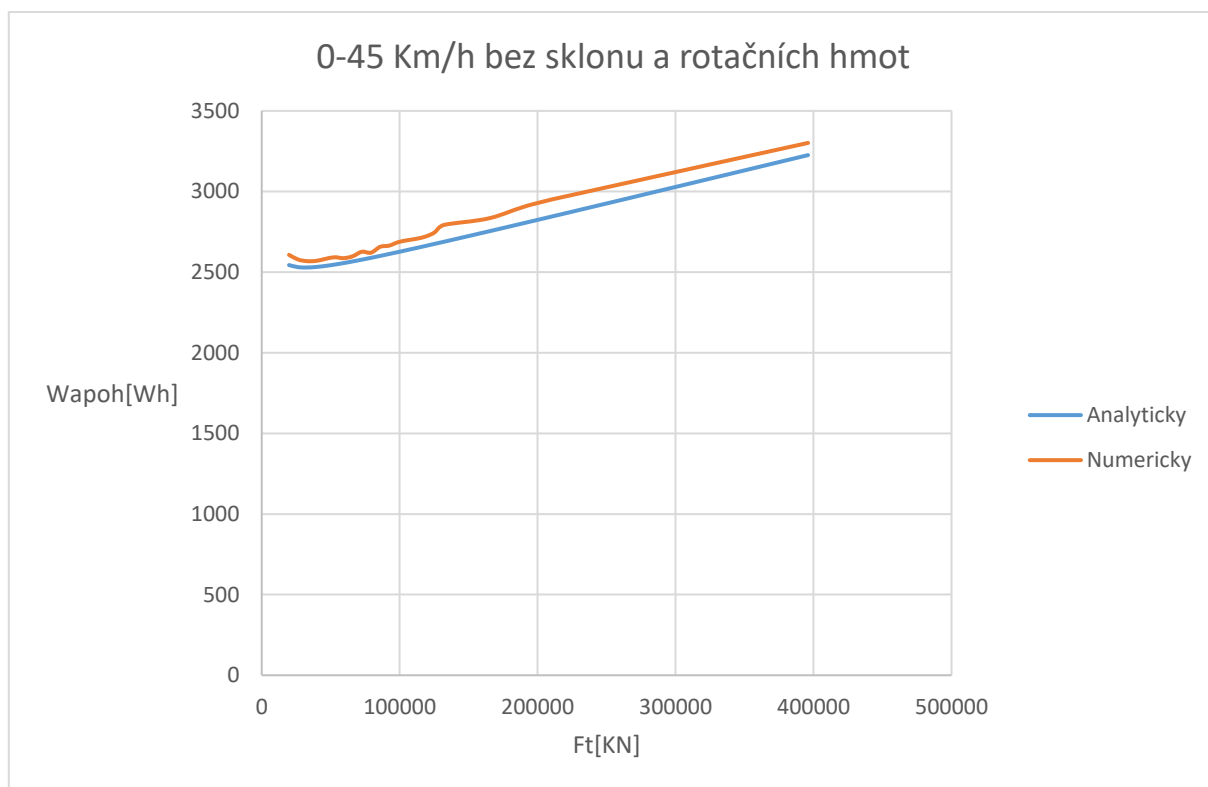
Jako důkaz následně přikládám tabulky a graf, kde jsme tento součinitel zanedbali:

0-45 Km/h numericky bez sklonu (bez započtení m_{rk})											
Ft [n%*Ftmax]	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Ft [N]	19800	26400	33000	39600	46200	52800	59400	66000	72600	79200	85800
W [Wh]	2607,145	2578,09932	2568,051	2570,018	2582,299	2592,285	2586,566	2598,598	2626,479	2620,504	2656,995

Tabulka 40 První část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 45 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu a bez započtení m_{rk}

0-45 Km/h numericky bez sklonu (bez započtení m_{rk})											
Ft [n%*Ftmax]	70	75	80	85	90	95	100	125	150	200	300
Ft [N]	92400	99000	105600	112200	118800	125400	132000	165000	198000	264000	396000
W [Wh]	2664,475	2686,094	2697,853	2706,979	2720,78	2746,65	2792,188	2834,214	2924,55	3052,492	3301,337

Tabulka 41 Druhá část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 45 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu a bez započtení m_{rk}



Obrázek 17 Graf zjištěných závislostí energie na rozjezd vozidla z 0 na 45 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu a bez započtení v numerickém výpočtu součinitele točivých hmot

Zde na **obrázku 17** je vidět shoda v extrému s analyticky zjištěnou křivkou a rozdíl v energii je pouhých 40 Wh.

0-45 Km/h analyticky při sklonu 8‰											
$F_t [n\% \cdot F_{tmax}]$	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
$F_t [N]$	19800	26400	33000	39600	46200	52800	59400	66000	72600	79200	85800
$W [J]$	16857987	13782810,7	12461670	11741243	11297555	11004097	10801274	10657332	10553797	10479194	10426016
$W [Wh]$	4682,774	3828,55852	3461,575	3261,457	3138,21	3056,694	3000,354	2960,37	2931,61	2910,887	2896,115

Tabulka 42 První část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 45 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 8 ‰

0-45 Km/h analyticky při sklonu 8‰											
$F_t [n\% \cdot F_{tmax}]$	70	75	80	85	90	95	100	125	150	200	300
$F_t [N]$	92400	99000	105600	112200	118800	125400	132000	165000	198000	264000	396000
$W [J]$	10389146	10364978	10350894	10344950	10345673	10351923	10362807	10466088	10619442	10998458	11872864
$W [Wh]$	2885,874	2879,16	2875,248	2873,597	2873,798	2875,534	2878,557	2907,247	2949,845	3055,127	3298,018

Tabulka 43 Druhá část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 45 Km/h na tažné síle na přímé trati bez se sklonem 8 ‰

0-45 Km/h numericky při sklonu 8‰											
$F_t [n\% \cdot F_{tmax}]$	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
$F_t [N]$	19800	26400	33000	39600	46200	52800	59400	66000	72600	79200	85800
$W [Wh]$	5100,104	4106,24051	3695,477	3464,358	3337,754	3244,707	3175,392	3134,975	3103,272	3076,737	3062,484

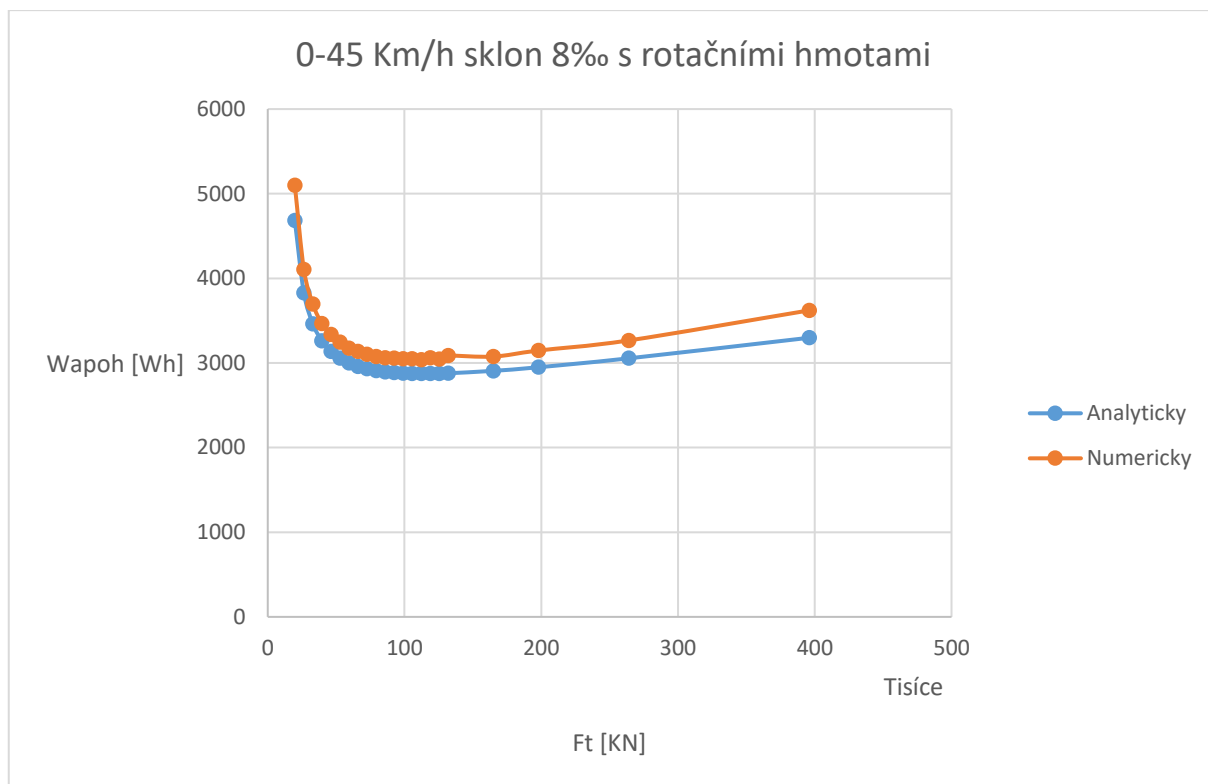
Tabulka 44 První část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 45 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 8 ‰

0-45 Km/h numericky při sklonu 8‰											
$F_t [n\% \cdot F_{tmax}]$	70	75	80	85	90	95	100	125	150	200	300
$F_t [N]$	92400	99000	105600	112200	118800	125400	132000	165000	198000	264000	396000
$W [Wh]$	3057,413	3048,315	3050,411	3037,834	3061,797	3045,179	3085,517	3075,585	3147,407	3266,589	3621,735

Tabulka 45 Druhá část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 45 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 8 ‰

0-45 Km/h		
$F_t [n\% \cdot F_{tmax}]$	85	100
$F_t [N]$	112200	132000
$W [Wh]$	3037,834	3085,517
$t [s]$	14,1	11,9

Tabulka 46 Tabulka odhalující rozdíly mezi volbou tažné síly v energetickém minimu a při maximální tažné síle



Obrázek 18 Graf zjištěných závislostí energie na rozjezd vozidla z 0 na 45 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 8‰

Z tohoto grafu na **obrázku 18** a tabulek je patrné, že při přidání sklonu se viditelně posune energetické minimum, a to dokonce do $0,85 \cdot F_{tmax}$. Energie potřebná na rozjetí při tomto sklonu za předpokladu F_{tmax} se zvětší zhruba 161 Wh. Analytický výraz se nám pro nalezení extrému jeví stále použitelný vzhledem ke tvaru obou průměrů.

0-80 Km/h analyticky bez sklonu (Fsk jako při v=0)										
Ft [n%*F _{tmax}]	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Ft [N]	19800	26400	33000	39600	46200	52800	59400	66000	72600	79200
W [J]	28729212	28514523,2	28423800,7	28393759,1	28397925	28423270	28462636	28511764	28567962	28629443
W [Wh]	7980,337	7920,70088	7895,500194	7887,15531	7888,313	7895,353	7906,288	7919,935	7935,545	7952,623

Tabulka 47 První část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 80 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu

0-80 Km/h analyticky bez sklonu (Fsk jako při v=0)										
Ft [n%*F _{tmax}]	65	70	75	80	85	90	95	100	125	150
Ft [N]	85800	92400	99000	105600	112200	118800	125400	132000	165000	198000
W [J]	28694977	28763688	28834934	28908237	28983232	29059634	29137219	29215809	29619595	30034789
W [Wh]	7970,827	7989,913	8009,704	8030,066	8050,898	8072,12	8093,672	8115,503	8227,665	8342,997

Tabulka 48 Druhá část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 80 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu

0-80 Km/h numericky bez sklonu										
Ft [n%*F _{tmax}]	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Ft [N]	19800	26400	33000	39600	46200	52800	59400	66000	72600	79200
W [Wh]	9346,654	8998,96992	8822,223183	8726,58932	8668,686	8621,941	8615,858	8594,11	8597,514	8619,243

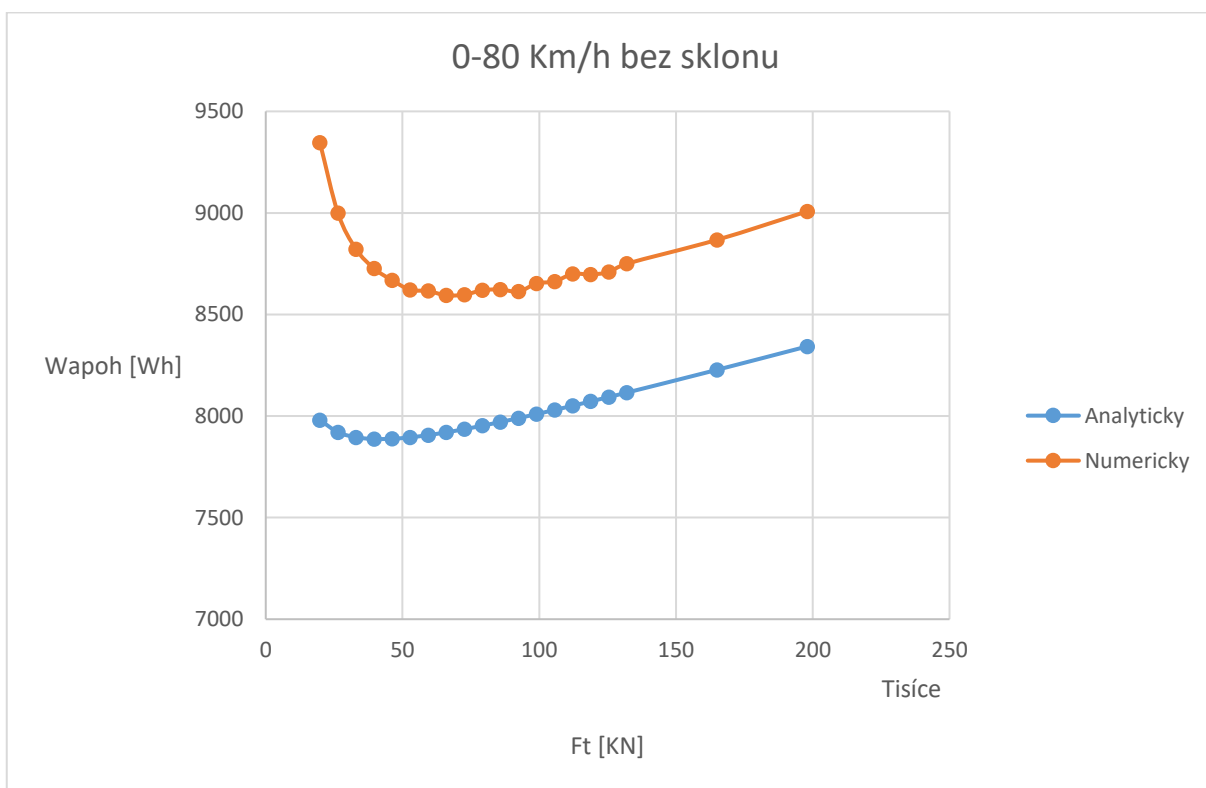
Tabulka 49 První část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 80 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu

0-80 Km/h numericky bez sklonu										
F _t [n%*F _{tmax}]	65	70	75	80	85	90	95	100	125	150
F _t [N]	85800	92400	99000	105600	112200	118800	125400	132000	165000	198000
W [Wh]	8623,601	8613,003	8652,57	8662,866	8699,621	8697,155	8709,024	8750,06	8867,773	9007,972

Tabulka 50 Druhá část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 80 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu

0-80 Km/h		
F _t [n%*F _{tmax}]	50	100
F _t [N]	66000	132000
W [Wh]	8594,11	8750,05957
t [s]	47	23,1

Tabulka 51 Tabulka odhalující rozdíly mezi volbou tažné síly v energetickém minimu a při maximální tažné síle



Obrázek 19 Graf zjištěných závislostí energie na rozjezd vozidla z 0 na 80 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu

Zde na **obrázku 19** již spatřujeme značný vliv zanedbání síly F_{vzd} u analyticky vypočtené křivky, kde nám rozdíl činí více, jak 500 Wh. Co se týká extrému ten jsme u numericky spočtené křivky našli při tažné síle $F_t = 50 \% F_{tmax}$. Dopad úspory energie na rychlost nalezneme v tabulce 51.

0-80 Km/h analyticky se sklonem 8‰ (Fsk jako při v=0)								
Ft [n%*F _{tmax}]	20	25	30	35	40	45	50	55
Ft [N]	26400	33000	39600	46200	52800	59400	66000	72600
W [J]	43135209,7	38907054,9	36570697	35105855	34114124	33407827	32886958,34	32493344
W [Wh]	11982,0027	10807,51525	10158,53	9751,626	9476,146	9279,952	9135,266205	9025,929

Tabulka 52 První část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 80 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 8 ‰

0-80 Km/h analyticky se sklonem 8‰ (Fsk jako při v=0)											
Ft [n%*F _{tmax}]	60	65	70	75	80	85	90	95	100	125	150
Ft [N]	79200	85800	92400	99000	105600	112200	118800	125400	132000	165000	198000
W [J]	32190842	31955812	31772142	31628470	31516558	31430282	31364999	31317123	31283841	31271305	31416460
W [Wh]	8941,901	8876,615	8825,595	8785,686	8754,599	8730,634	8712,5	8699,201	8689,956	8686,474	8726,794

Tabulka 53 Druhá část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 80 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 8 ‰

0-80 Km/h numericky se sklonem 8‰								
Ft [n%*F _{tmax}]	20	25	30	35	40	45	50	55
Ft [N]	26400	33000	39600	46200	52800	59400	66000	72600
W [Wh]	18807,706	14484,00962	12730,95	11775,1	11178,36	10763,28	10474,74114	10257,64

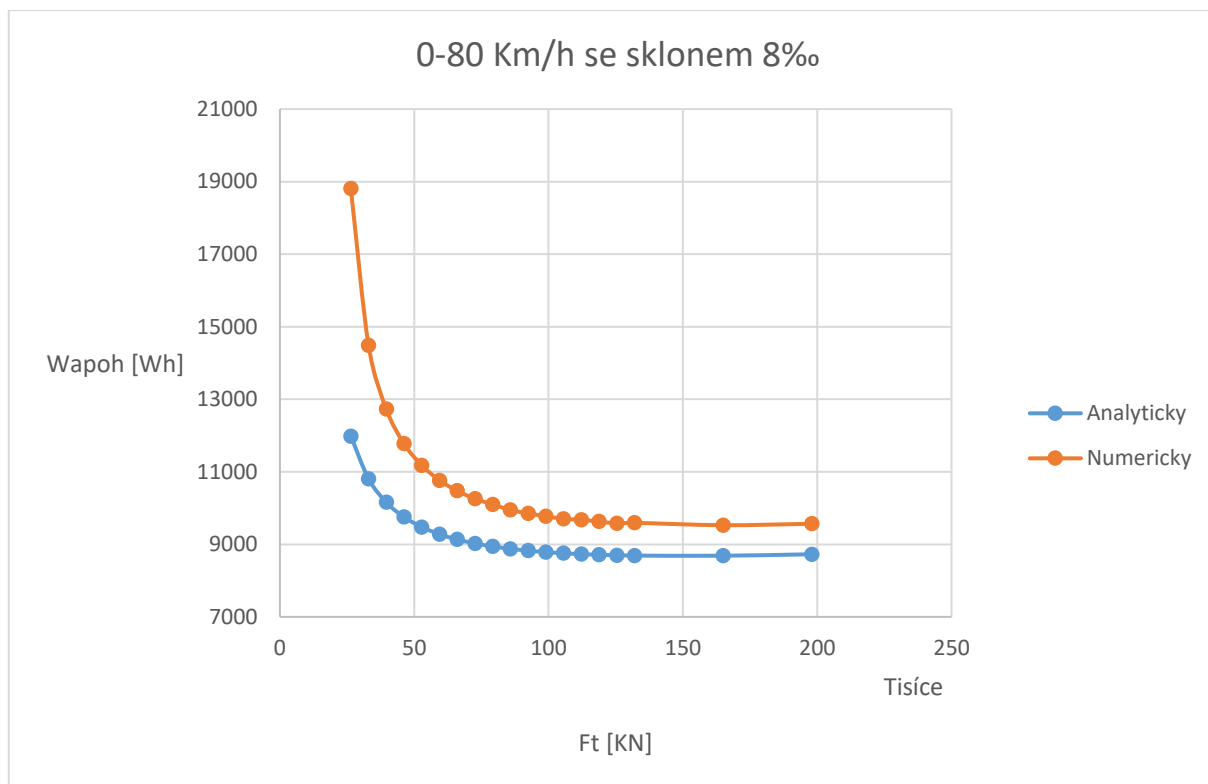
Tabulka 54 První část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 80 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 8 ‰

0-80 Km/h numericky se sklonem 8‰											
Ft [n%*F _{tmax}]	60	65	70	75	80	85	90	95	100	125	150
Ft [N]	79200	85800	92400	99000	105600	112200	118800	125400	132000	165000	198000
W [Wh]	10101,84	9947,815	9854,963	9774,309	9704,313	9674,903	9628,299	9579,606	9592,496	9528,1	9566,348

Tabulka 55 Druhá část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 80 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 8 ‰

0-80 Km/h	
F _t [n%*F _{tmax}]	100
F _t [N]	132000
W [Wh]	9592,49633
t [s]	25,2

Tabulka 56 Tabulka s údajem potřebného času na rozjeti na požadovanou rychlost při sklonu 8 ‰



Obrázek 20 Graf zjištěných závislostí energie na rozjezd vozidla z 0 na 80 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 8 ‰

U tohoto případu – **obrázek 20** – nastala situace, kdy se nám extrém povedlo najít v daném námi testovaném rozsahu F_t až za hranici F_{tmax} utvrzuje nás to v závěru, že u reálného vozidla při rozjíždění do stoupání se nám vyplatí rozjíždět s maximálním možným tahem F_t . Pokud vyjdeme z tabulek 56 a 51, tak dojdeme k závěru, že sklon 8 ‰ navýšil celkovou potřebnou energii o 842 Wh a prodloužil čas rozjezdu o 2,1s.

0-160 Km/h analyticky bez sklonu (Fsk jako při v=0)							
Ft [n%*F _{tmax}]	30	35	40	45	50	55	60
Ft [N]	39600	46200	52800	59400	66000	72600	79200
W [J]	1,13E+08	112343654	112269935,6	112252290	1,12E+08	1,12E+08	1,12E+08
W [Wh]	31250,57	31206,5705	31186,09323	31181,1918	31187,13	31200,93	31220,6

Tabulka 57 První část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 160 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu

0-160 Km/h analyticky bez sklonu (Fsk jako při v=0)										
Ft [n%*F _{tmax}]	65	70	75	80	85	90	95	100	125	150
Ft [N]	85800	92400	99000	105600	112200	118800	125400	132000	165000	198000
W [J]	1,12E+08	1,13E+08	1,13E+08	1,13E+08	1,13E+08	1,13E+08	1,13E+08	1,13E+08	1,14E+08	1,15E+08
W [Wh]	31244,77	31272,46	31302,98	31335,78	31370,45	31406,7	31444,25	31482,92	31688,32	31906,39

Tabulka 58 Druhá část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 160 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu

0-160 Km/h numericky bez sklonu								
Ft [n%*F _{tmax}]	30	35	40	45	50	55	60	65
Ft [N]	39600	46200	52800	59400	66000	72600	79200	85800
W [Wh]	63062,58	52748,3905	47994,11243	45181,5536	43336,95	42017,8	41055,53	40320,64

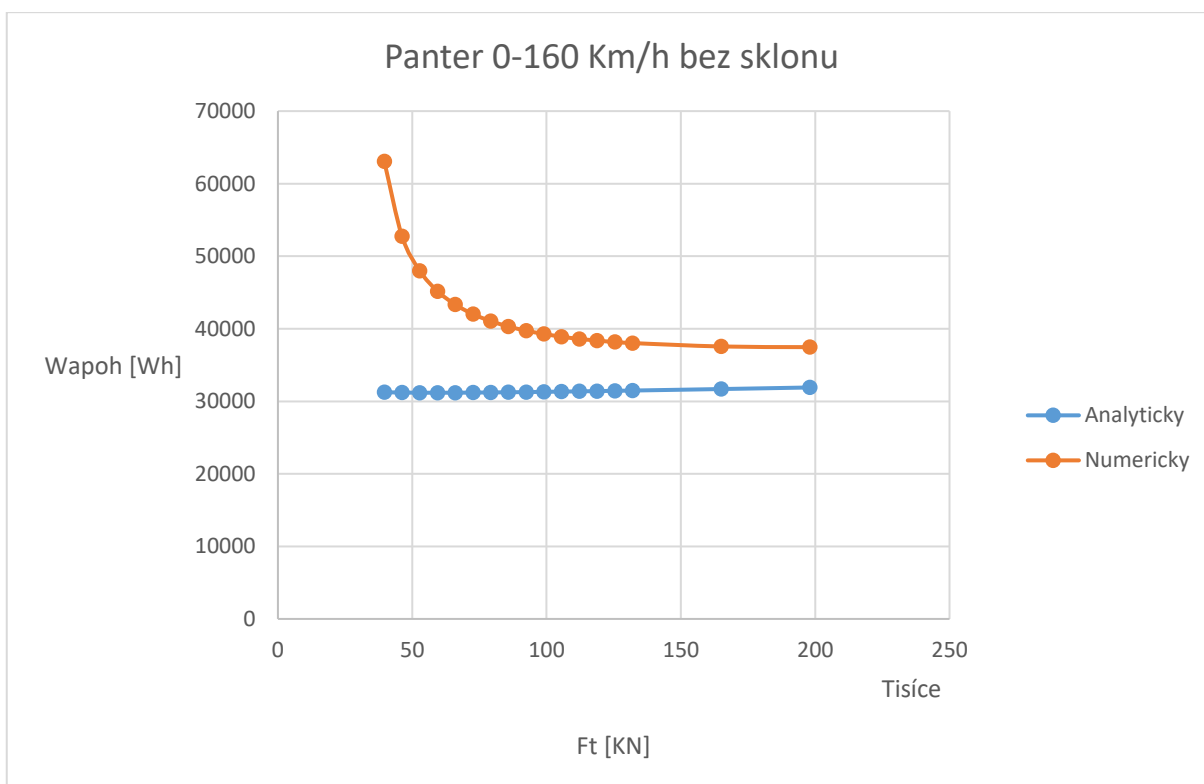
Tabulka 59 První část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 160 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu

0-160 Km/h numericky bez sklonu									
Ft [n%*F _{tmax}]	70	75	80	85	90	95	100	125	150
Ft [N]	92400	99000	105600	112200	118800	125400	132000	165000	198000
W [Wh]	39730,55	39286,63	38902,52	38598,44	38374,92	38166,55	38025,18	37557,72	37465,13

Tabulka 60 Druhá část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 160 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu

0-160 Km/h	
F _t [n%*F _{tmax}]	100
F _t [N]	132000
W [Wh]	38025,18
t [s]	82,7

Tabulka 61 Tabulka s údajem potřebného času na rozjeti na požadovanou rychlost bez sklonu



Obrázek 21 Graf zjištěných závislostí energie na rozjezd vozidla z 0 na 160 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu

V případě rozjezdu vlaku z 0 na 160 Km/h docházíme k závěru, že odbuzení asynchronního motoru spolu s odporem vzduchu hrají významnou roli a, že při rozjezdu na takovou rychlost se vyplatí rozjíždět s maximálním F_t , neboť dle průběhů v grafu – **obrázek 21** – se extrém minimálního odběru energie nachází až za hodnotou maximální tažné síly F_t .

0-160 Km/h analyticky se sklonem 8‰ (Fsk jako při v=0)						
Ft [n%*F _{tmax}]	50	55	60	65	70	75
Ft [N]	66000	72600	79200	85800	92400	99000
W [J]	129502334	127757150,4	1,26E+08	1,25E+08	1,24E+08	1,24E+08
W [Wh]	35972,8705	35488,09732	35104,33	34795,35	34543,32	34335,62

Tabulka 62 První část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 160 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 8 ‰

0-160 Km/h analyticky se sklonem 8‰ (Fsk jako při v=0)							
Ft [n%*F _{tmax}]	80	85	90	95	100	125	150
Ft [N]	105600	112200	118800	125400	132000	165000	198000
W [J]	1,23E+08	1,22E+08	1,22E+08	1,22E+08	1,21E+08	1,2E+08	1,2E+08
W [Wh]	34163,13	34019,06	33898,26	33796,76	33711,43	33455,39	33374,16

Tabulka 63 Druhá část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 160 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 8 ‰

0-160 Km/h numericky se sklonem 8‰						
Ft [n%*F _{tmax}]	50	55	60	65	70	75
Ft [N]	66000	72600	79200	85800	92400	99000
W [Wh]	118577,57	81812,38059	69333,02	62446,13	57986,88	54834,26

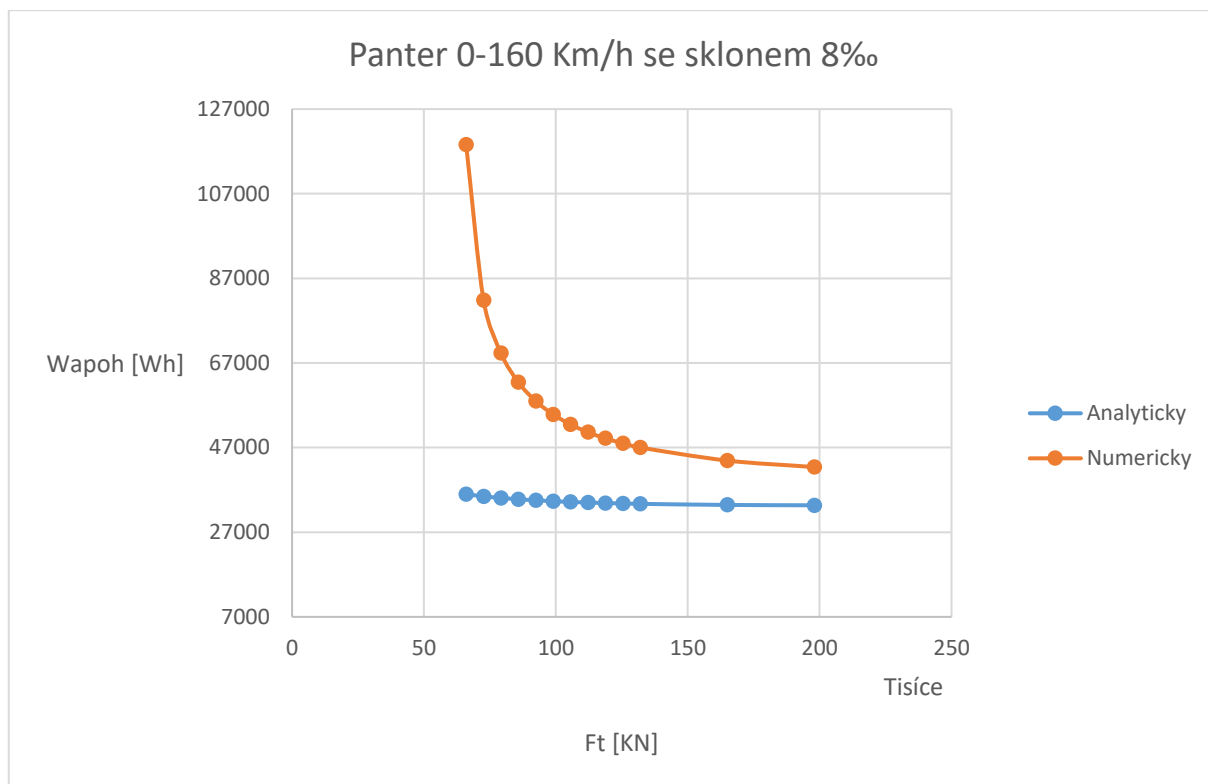
Tabulka 64 První část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 160 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 8 ‰

0-160 Km/h numericky se sklonem 8‰							
Ft [n%*F _{tmax}]	80	85	90	95	100	125	150
Ft [N]	105600	112200	118800	125400	132000	165000	198000
W [Wh]	52457,6	50627,66	49195,29	48014,87	47017,27	43938,54	42407,76

Tabulka 65 Druhá část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 160 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 8 ‰

0-160 Km/h	
F _t [n%*F _{tmax}]	100
F _t [N]	132000
W [Wh]	47017,2701
t [s]	101,4

Tabulka 66 Tabulka s údajem potřebného času na rozjetí na požadovanou rychlost se sklonem 8 ‰



Obrázek 22 Graf zjištěných závislostí energie na rozjezd vozidla z 0 na 160 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 8 ‰

V tomto případě – **obrázek 22** – stojí za povšimnutí poměrně velký nárůst požadavku na celkovou energii oproti rozjezdu bez sklonu, kdy rozdíl činí 8992 Wh a doba rozjezdu se navýšila o 18,7s.

0-160 Analyticky se sklonem 20 ‰ (Fsk jako při v=0)						
$F_t [n\% \cdot F_{tmax}]$	85	90	95	100	125	150
$F_t [N]$	112200	118800	125400	132000	165000	198000
$W [J]$	1,4E+08	138517027	137048242,3	1,36E+08	1,31E+08	1,29E+08
$W [Wh]$	38952,14	38476,9518	38068,95619	37716,01	36509,25	35847,79

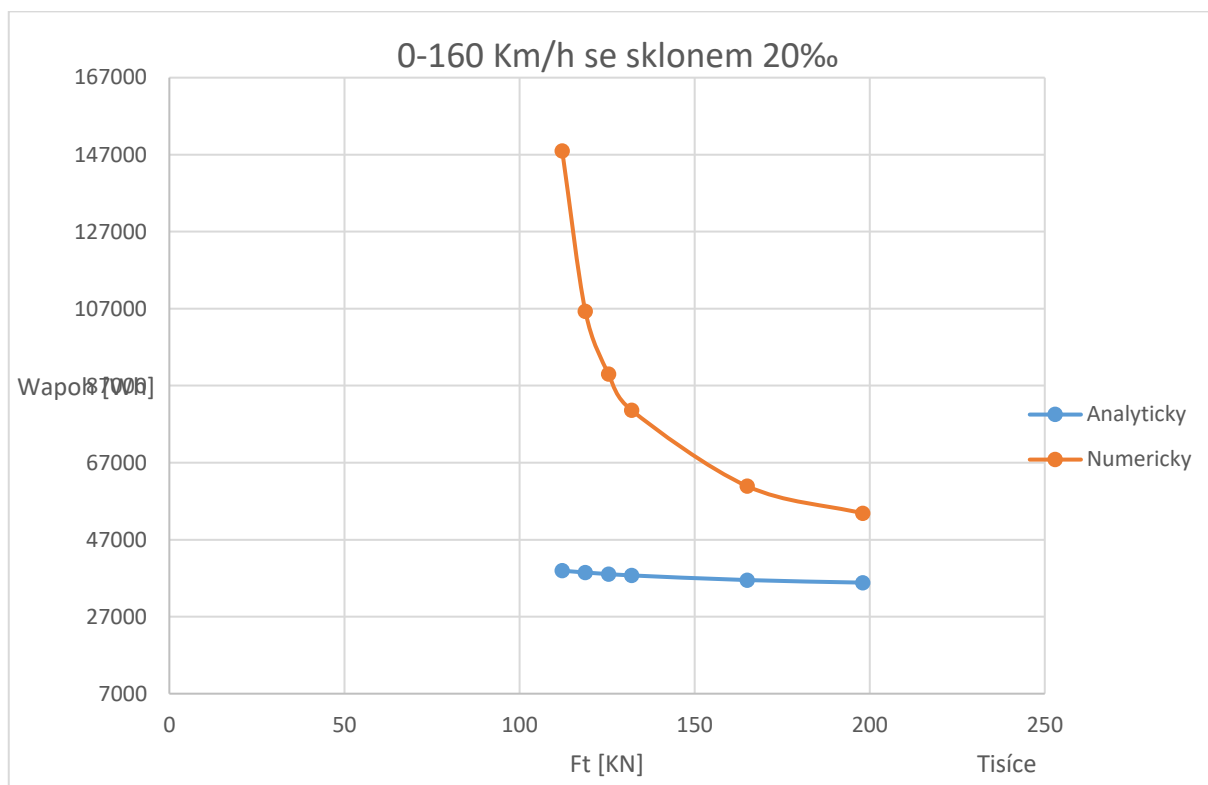
Tabulka 67 Tabulka zjištěná analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 160 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 20 ‰

0-160 Numericky se sklonem 20 ‰						
$F_t [n\% \cdot F_{tmax}]$	85	90	95	100	125	150
$F_t [N]$	112200	118800	125400	132000	165000	198000
$W [Wh]$	147966	106334,014	90051,37738	80617,22	60909,94	53845,06

Tabulka 68 Tabulka zjištěná numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 160 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 20 ‰

0-160 Km/h	
$F_t [n\% * F_{tmax}]$	100
$F_t [N]$	132000
$W [Wh]$	80617,22
$t [s]$	170,5

Tabulka 69 Tabulka s údajem potřebného času na rozjetí na požadovanou rychlost se sklonem 20 ‰



Obrázek 23 Graf zjištěných závislostí energie na rozjezd vozidla z 0 na 160 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 20 ‰

V tomto případě – **obrázek 23** –, už je opravdu veliký rozdíl mezi křivkou spočtenou numericky a spočtenou z analyticky zjištěného výrazu, který zanedbává odpor vzduchu definovaný silou F_{ZDV} a odbuzení asynchronních motorů, které se projeví na velikosti tažné síly F_t , což má za následek velké zvětšení doby potřebné na rozjezd vlaku.

Dále stojí za zmínku, že kvůli sklonu 20 ‰ vzrostl požadavek na celkovou energii oproti rozjezdu z 0 na 160 Km/h bez sklonu o 42592 Wh a doba potřebná na rozjezd vzrostla o 87,8s.

3.4 Porovnání numerických výsledků s výsledky ze simulačního systému pro případ reálného kolejového vozidla

Z důvodů ověření správnosti výsledků byla provedena kontrola numericky spočtené energie simulačním systémem Ing. Mlynaříka. Provedli jsme tuto kontrolu pro některé předem vybrané modelové situace rozjezdů za účelem spočtení potřebné energie na obvodu kol, jenž je dominantní složkou z námi spočtené celkové energie. Je to celková energie W_{apoh} bez energie spočítané na krytí Joulových ztrát.

Tabulka vypočtených hodnot pro dané modelové situace:

Porovnání numerických výpočtů s výsledky ze simulátoru					
Rozjezd [Km/h]	0-45	0-45	0-80	0-80	0-160
Sklon [‰]	0	0	8	0	20
$F_t [n\% \cdot F_{tmax}]$	0,55	1	1	1	1
$F_t [N]$	72600	132000	132000	132000	132000
Simulátor [Wh]	2520	2570	9220	8079	87 000
Numericky [Wh]	2566	2586	8933	8146	76158
$\Delta X [-]$	46	16	287	67	10842
$\delta X [\%]$	1,8	0,6	3	0,8	12,4

Tabulka 70 Tabulka s porovnáním numerických výpočtů s výsledky ze simulátoru

Na základě výsledků uvedených v tabulce 70 můžeme konstatovat, že jsme počítali s poměrně vysokou přesností. Výsledky se nám liší výrazněji jenom v situaci, kde počítáme se značným stoupáním při rozjezdu na maximální rychlost RegioPanteru při trolejovém napájení. Tento rozdíl je dán pravděpodobně tou skutečností, že simulační systém pracuje při rozjezdu s konstantní velikostí zrychlení a .

Závěr

Na základě provedených výpočtů za účelem energetické optimalizace rozjezdu kolejového vozidla jsme došli k závěru, že opravdu existuje jistý extrém energetického minima odpovídající určité tažné síle kolejového vozidla, při kterém jsou nároky na odebranou energii minimální. Poloha tohoto extrému se však ve vztahu k tažné síle ovšem mění vzhledem k požadovaným rychlostem a sklonu trati na které se kolejové vozidlo rozjíždí.

Tyto extrémy jsme hledali jak za pomoci numerických výpočtů, tak za pomoci analyticky odvozeného vzorce, jenž uvažuje konstantní jízdní odpory, neuvažuje odpor vzduchu a není schopen zohlednit odbuzení motorů.

Došli jsme k závěru, že pro případ experimentálního vozítka a nejspíš i případ dalších podobných kolejových vozidel by bylo dobré řešit vhodnou velikost tažné síly, neboť ne vždy v takovýchto případech je nejekonomičtější rozjíždět se s maximální tažnou silou. Pokud bychom se bavili v tomto případě o použitelnosti analytického výrazu došli bychom k závěru, že v případě experimentálního vozítka je tento výraz použitelný a vypočtené hodnoty z něj se nikterak výrazně neliší od těch vypočtených numerickou cestou.

Pokud bychom se posunuli a aplikovali podobnou metodiku na reálné kolejové vozidlo jako je v našem případě RegioPanter řady 640 došli bychom k závěru, že optimální tažnou sílu za účelem úspory energie má cenu řešit pouze v případě malých rychlostí, jako je v našem případě rychlost od 0 do 45 Km/h. A v případě rychlosti od 0 do 80 Km/h a to pouze v tom případě, že se bude jednat o trat bez sklonu, neboť jak bylo v této práci prokázáno i sklon pouhých 8 ‰ při těchto nízkých rychlostech dokáže zapříčinit posun takřka prakticky do maxima tažné síly.

Co se týká použitelnosti analytického výrazu při výpočtech požadavku energie na rozjezd reálného vozidla je velmi dobře použitelný při rychlostech, kdy nedochází k odbuzení trakčních motorů ani velkým ztrátám vlivem odporu vzduchu, jak se dalo očekávat, což prokázali výpočty v části zabývající se rychlostí od 0 do 45 Km/h. Při vyšších rychlostech by mohl posloužit spíše k řádovému určení očekávané potřebné energie na rozjezd kolejového vozidla, což by nám až tak nemuselo vadit, protože už při rychlostech nad 80 Km/h nám vychází nejlépe rozjezd maximální tažnou silou.

Ke konci bych se chtěl zmínit, že všechny pro určení závěru podstatné výsledky byly porovnány s výsledky zjištěnými simulačním systémem Ing. Mlynaříka. Tyto výsledky vyšly v očekávané toleranci a s relativní chybou do 3 %, jen v jednom případě při rozjezdu na rychlost 160 Km/h a sklonu 20‰ vyšla relativní chyba 12,4 % z důvodů, že simulační systém pracuje s konstantním zrychlením a při rozjezdu. Na závěr bych chtěl zmínit, že když budeme volit pro malé velikosti rychlostí menší tažné síly na rozjezd, tak se nám doba rozjezdu pochopitelně protáhne, ale co je zajímavé a co prokázal simulační systém dojde také k tomu, že ujedeme delší vzdálenost, což nás pak vede k tomu zamyslet se, jak moc je pro nás úspora energie důležitá.

Tato práce, tak odpovídá na otázky, které si někdo mohl pokládat po přečtení práce: [4], která byla použita jako podklad a je odcitována v použité literatuře.

Použitá literatura

- [1] DANZER, Jiří a Jiří ŠAŠEK. *Elektrická trakce IV*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2007. ISBN 978-80-7043-586-1.
- [2] SVOBODA, Emanuel, Milan BEDNAŘÍK a Miroslava ŠIROKÁ. *Fyzika pro gymnázia*. 5., přeprac. vyd. Praha: Prometheus, 2013. ISBN 978-80-7196-431-5.
- [3] MĚŘIČKA, Jiří a Petr VOŽENÍLEK. *Elektrické stroje*. Praha: České vysoké učení technické, 1993. ISBN 80-01-01020-1.
- [4] *Optimalizace jízdního profilu pro kolejové vozidlo s akumulátorovým napájením*. – interní materiál DFJP UPCE.
- [5] NOVÁK, Jaroslav, Ladislav MLYNAŘÍK, Ondřej SADÍLEK a Tomáš. *Analýza využitelnosti hybridizovaných jednotek ř. 440 a ř. 640 v podmínkách železniční sítě ČR*. 2015.
- [6] In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/RegioPanter>
- [7] [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <http://www.vagony.cz/vagony/energie.html>

Seznam obrázků

Obrázek 1 Profil rychlosti při jízdě vozidla, zdroj [4]	3
Obrázek 2 Závislost proudu asynchronního motoru na momentu bez optimalizace a s optimalizací magnetického toku, zdroj [4]	9
Obrázek 3 Závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 16 km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu – porovnání se zahrnutím ztrát v akumulátorové baterii, zdroj [4]	11
Obrázek 4 Graf výsledku měření jízdních odporů F_K , zdroj [4]	12
Obrázek 5 Graf vypočtených a naměřených hodnot jízdních odporů F_K	13
Obrázek 6 Graf zjištěných závislostí energie na rozjezd vozidla z 0 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu	16
Obrázek 7 Graf zjištěných závislostí energie na rozjezd vozidla z 0 na 8 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu	17
Obrázek 8 Graf zjištěných závislostí energie na rozjezd vozidla z 8 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu	19
Obrázek 9 Graf zjištěných závislostí energie na rozjezd vozidla z 0 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 12‰	20
Obrázek 10 Graf zjištěných závislostí energie na rozjezd vozidla z 0 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 24‰	22
Obrázek 11 Graf zjištěných závislostí energie na rozjezd vozidla z 8 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 24‰	23
Obrázek 12 Graf zohledňující tvar celé trakční charakteristiky pro systémy 3KV DC a 25KV 50 Hz	26
Obrázek 13 Graf zohledňující tvar trakční charakteristiky při rychlostech nad 45 Km/h a konstantním výkonu	27
Obrázek 14 Graf závislosti tažné síly a proudu motoru	28
Obrázek 15 Graf zjištěných závislostí energie na rozjezd vozidla z 0 na 45 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu se zanedbáním 0 na svislé ose	31
Obrázek 16 Graf zjištěných závislostí energie na rozjezd vozidla z 0 na 45 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu	31
Obrázek 17 Graf zjištěných závislostí energie na rozjezd vozidla z 0 na 45 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu a bez započtení v numerickém výpočtu součinitele točivých hmot	32
Obrázek 18 Graf zjištěných závislostí energie na rozjezd vozidla z 0 na 45 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 8‰	34
Obrázek 19 Graf zjištěných závislostí energie na rozjezd vozidla z 0 na 80 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu	35
Obrázek 20 Graf zjištěných závislostí energie na rozjezd vozidla z 0 na 80 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 8 ‰	37

Obrázek 21 Graf zjištěných závislostí energie na rozjezd vozidla z 0 na 160 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu	38
Obrázek 22 Graf zjištěných závislostí energie na rozjezd vozidla z 0 na 160 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 8 %	40
Obrázek 23 Graf zjištěných závislostí energie na rozjezd vozidla z 0 na 160 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 20 %	41

Seznam tabulek

Tabulka 1 Konstrukční parametry vozítka, zdroj [4].....	5
Tabulka 2 Parametrů pohonu experimentálního vozidla, zdroj [4]	6
Tabulka 3 Závislosti proudu asynchronního motoru na momentu bez optimalizace a s optimalizací magnetického toku, zdroj [4]	8
Tabulka 4 Výsledky měření jízdních odporů na experimentálním vozidle, zdroj [4]	12
Tabulka 5 Tabulka s naměřenými reálnými hodnotami F_K	13
Tabulka 6 Tabulka s vypočtenými hodnotami F_K	13
Tabulka 7 První část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu.....	15
Tabulka 8 Druhá část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu	15
Tabulka 9 První část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu.....	16
Tabulka 10 Druhá část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu	16
Tabulka 11 První část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 8 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu	17
Tabulka 12 Druhá část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 8 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu	17
Tabulka 13 První část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 8 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu	17
Tabulka 14 Druhá část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 8 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu	17
Tabulka 15 První část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 8 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu	18
Tabulka 16 Druhá část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 8 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu	18
Tabulka 17 První část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 8 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu	18
Tabulka 18 Druhá část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 8 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu	18
Tabulka 19 První část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 12%	19
Tabulka 20 Druhá část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 12%	19
Tabulka 21 První část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 12%	20

Tabulka 22 Druhá část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 12‰	20
Tabulka 23 První část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 24‰	21
Tabulka 24 Druhá část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 24‰	21
Tabulka 25 První část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 24‰	21
Tabulka 26 Druhá část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 24‰	21
Tabulka 27 První část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 8 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 24‰	22
Tabulka 28 Druhá část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 8 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 24‰	22
Tabulka 29 První část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 8 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 24‰	23
Tabulka 30 Druhá část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 8 na 16 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 24‰	23
Tabulka 31 Konstrukční parametry RegioPanteru, zdroj [5] a[6]	24
Tabulka 32 Tabulka hlavních technických dat RegioPantera.....	25
Tabulka 33 Tabulka hodnot zohledňující tvar trakční charakteristiky pro systémy 3KV DC a 25KV 50 Hz.....	26
Tabulka 34 Tabulka zohledňující tvar trakční charakteristiky při rychlostech nad 45 Km/h a konstantním výkonu.....	26
Tabulka 35 První část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 45 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu.....	30
Tabulka 36 Druhá část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 45 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu.....	30
Tabulka 37 První část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 45 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu.....	30
Tabulka 38 Druhá část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 45 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu.....	30
Tabulka 39 Tabulka odhalující rozdíly mezi volbou tažné síly v energetickém minimu a při maximální tažné síle	30
Tabulka 40 První část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 45 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu a bez započtení m_{rk}	32

Tabulka 41 Druhá část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 45 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu a bez započtení m_{rk}	32
Tabulka 42 První část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 45 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 8 ‰	33
Tabulka 43 Druhá část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 45 Km/h na tažné síle na přímé trati bez se sklonem 8‰.....	33
Tabulka 44 První část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 45 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 8 ‰	33
Tabulka 45 Druhá část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 45 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 8 ‰	33
Tabulka 46 Tabulka odhalující rozdíly mezi volbou tažné síly v energetickém minimu a při maximální tažné síle	33
Tabulka 47 První část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 80 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu	34
Tabulka 48 Druhá část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 80 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu	34
Tabulka 49 První část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 80 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu	34
Tabulka 50 Druhá část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 80 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu	35
Tabulka 51 Tabulka odhalující rozdíly mezi volbou tažné síly v energetickém minimu a při maximální tažné síle	35
Tabulka 52 První část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 80 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 8 ‰	36
Tabulka 53 Druhá část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 80 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 8 ‰	36
Tabulka 54 První část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 80 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 8 ‰	36
Tabulka 55 Druhá část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 80 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 8 ‰	36
Tabulka 56 Tabulka s údajem potřebného času na rozjeti na požadovanou rychlost při sklonu 8 ‰	36
Tabulka 57 První část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 160 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu	37
Tabulka 58 Druhá část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 160 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu	37
Tabulka 59 První část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 160 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu	38

Tabulka 60 Druhá část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 160 Km/h na tažné síle na přímé trati bez sklonu	38
Tabulka 61 Tabulka s údajem potřebného času na rozjeti na požadovanou rychlost bez sklonu	38
Tabulka 62 První část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 160 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 8 ‰	39
Tabulka 63 Druhá část tabulky zjištěné analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 160 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 8 ‰	39
Tabulka 64 První část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 160 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 8 ‰	39
Tabulka 65 Druhá část tabulky zjištěné numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 160 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 8 ‰	39
Tabulka 66 Tabulka s údajem potřebného času na rozjeti na požadovanou rychlost se sklonem 8 ‰	39
Tabulka 67 Tabulka zjištěná analytickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 160 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 20 ‰	40
Tabulka 68 Tabulka zjištěná numerickým výpočtem zohledňující závislost energie na rozjezd vozidla z 0 na 160 Km/h na tažné síle na přímé trati se sklonem 20 ‰	40
Tabulka 69 Tabulka s údajem potřebného času na rozjeti na požadovanou rychlost se sklonem 20 ‰	41
Tabulka 70 Tabulka s porovnáním numerických výpočtů s výsledky ze simulátoru	42

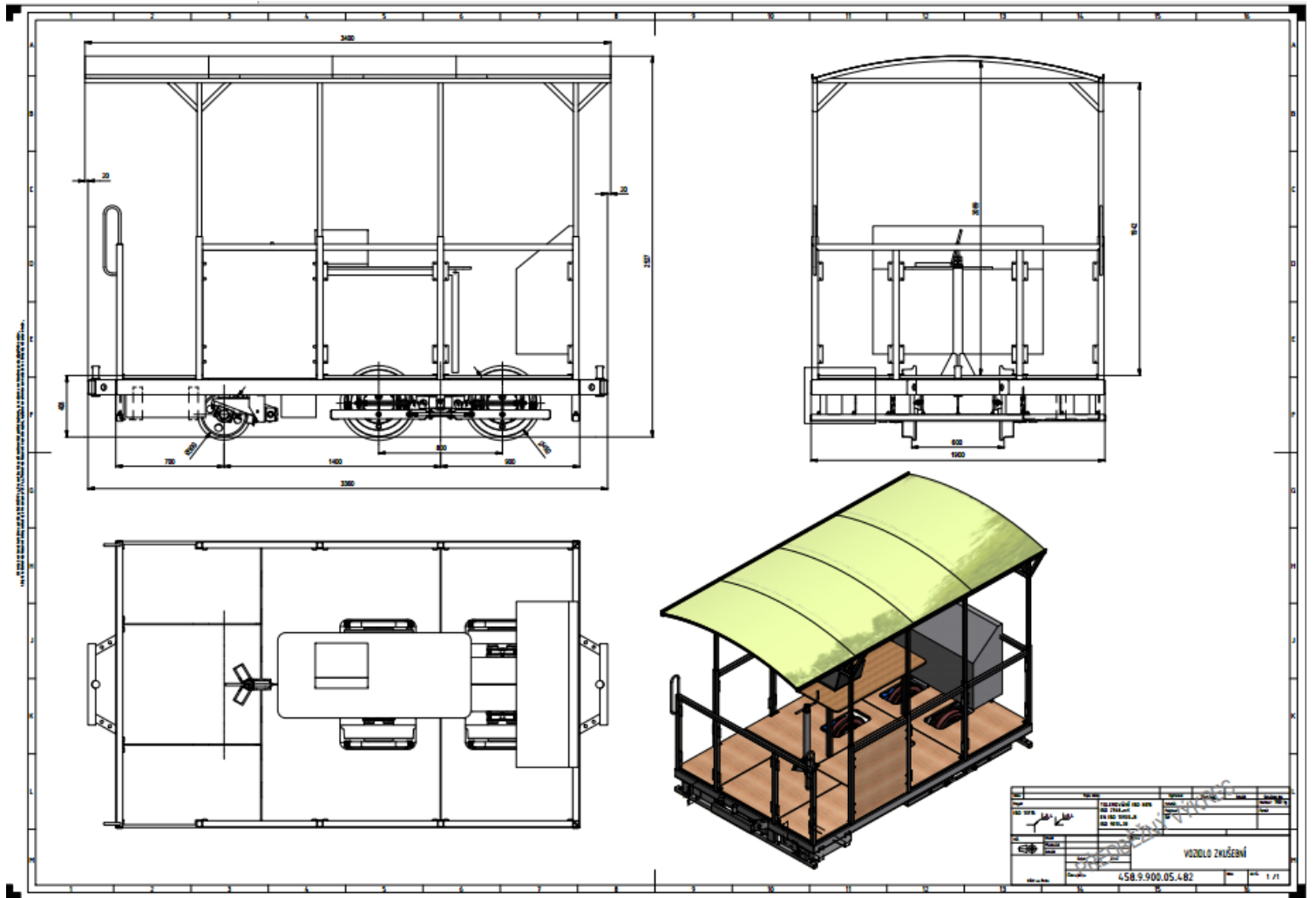
Seznam příloh

P

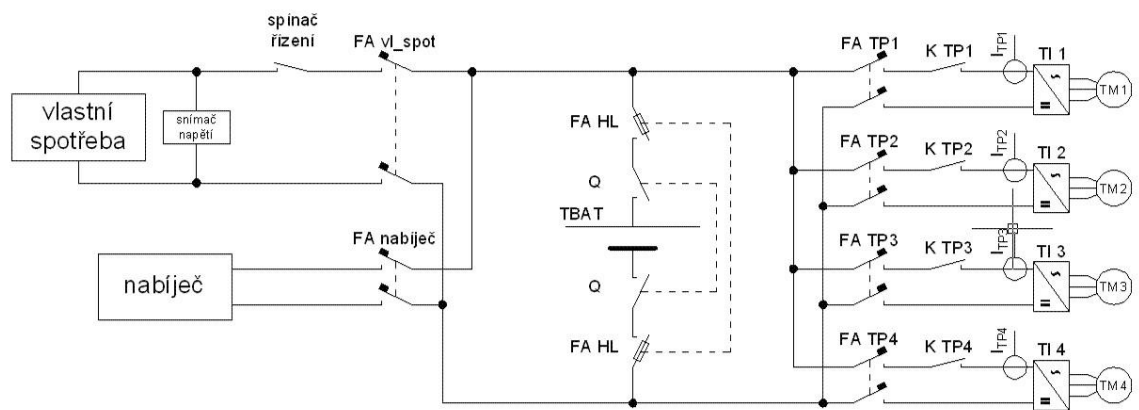
Příloha A.....	51
Příloha B.....	52
Příloha C.....	53

Přílohy

Příloha A – Obrázek technického výkres experimentálního vozítka – zdroj výkresu: VUKV



Příloha B – Schéma výkonového obvodu experimentálního vozidla – zdroj: [4]



Příloha C – Blokové schéma hybridizované jednotky řady 640 – zdroj: [5]

