

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ**

Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel



Bakalářská práce

Výpočet trakčních vlastností třívozové tramvajové soupravy

Calculation of traction properties of the articulated freight tram

Studijní program: Teoretický základ strojího inženýrství

Studijní obor: Studijní program je bezoborový

Vedoucí práce: doc. Ing. Josef Kolář, CSc.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Čermák** Jméno: **Pavel** Osobní číslo: **457650**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Výpočet trakčních vlastností třívozové tramvajové soupravy

Název bakalářské práce anglicky:

Calculation of traction properties of the articulated freight tram

Pokyny pro vypracování:

Vypracujte:

1. Rešerší používaných nákladních tramvají.
2. Hmotnostní analýzu nákladní tramvaje T3 a stanovte napravné zatížení.
3. Trakční charakteristiky nákladních tramvajových souprav na bázi vozů T3 + T3, T3 + N3 + T3, T3 + T3 + T3.
4. Analýzu jízdního cyklu souprav T3 + T3, T3 + N3 + T3 a T3 + T3 + T3 na dráze 350 m při jízdě v přímé trati.
5. Analýzu jízdního cyklu souprav T3 + T3, T3 + N3 + T3 a T3 + T3 + T3 na dráze 350 m při jízdě do stoupání.
6. Průvodní technickou zprávu a typový výkres soupravy nákladní tramvaje T3+T3.

Seznam doporučené literatury:

Odborné časopisy, firemní literatura, patentová literatura, normy.

Skripta ČVUT:

KOLÁŘ, J.: Teoretické základy konstrukce kolejových vozidel

ŠÍBA, J.: Kolejová vozidla II,

ŠÍBA, J.: Kolejová vozidla II - pojezd

MARUNA, Z., HOFFMANN, V., KOULA, J. KROUPOVÁ, Z.: Metodika konstruování kolejových vozidel - osobní a nákladní podvozky

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

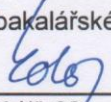
doc. Ing. Josef Kolář, CSc., ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

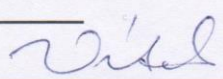
Datum zadání bakalářské práce: **18.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **11.07.2018**


Platnost zadání bakalářské práce: _____



doc. Ing. Josef Kolář, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce



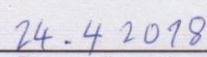
doc. Ing. Oldřich Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



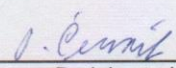
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.



Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Výpočet trakčních vlastností třívozové tramvajové soupravy“ vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Josefa Koláře, CSc. s použitím literatury uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze 2. 7. 2018

Pavel ČERMÁK

.....

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat doc. Ing. Josefu Kolářovi, CSc. za odborné vedení, cenné rady a příjemný přístup při tvorbě mé bakalářské práce.

Anotační list

Jméno autora:	Pavel Čermák
Název BP:	Výpočet trakčních vlastností třívozové tramvajové soupravy
Anglický název:	Calculation of traction properties of the articulated freight tram
Rok:	2018
Studijní program:	Teoretický základ strojního inženýrství
Obor studia:	Studijní program je bezoborový
Ústav:	Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel
Vedoucí BP:	doc. Ing. Josef Kolář, CSc.
Bibliografické údaje:	počet stran: 54 počet obrázků: 47 počet tabulek: 11 počet příloh: 1
Klíčová slova:	nákladní tramvaj T3, dvou a třívozová souprava, trakční charakteristiky, jízdní odpory, jízdní cyklus
Key words:	CarGo tram T3, articulated freight tram, traction characteristics, driving resistors, driving cycle

Anotace

Téma mé bakalářské práce vniklo v návaznosti na projekt pro transport a zpracování směsného komunálního odpadu (dále jen SKO), který začal v rámci volitelného předmětu Strojírenské konstruování IV.

Moje bakalářská práce se zabývá trakční mechanikou souprav upravené tramvaje tatra T3. Úprava tramvaje spočívá ve vytvoření nákladního kolejového vozu schopného převážet po městské kolejové síti komunální odpad, případně i jiný náklad.

Mechanickými výpočty analyzuji více druhů zapojení souprav. Jednotlivé soupravy jsou vždy analyzovány při předpokládaném plném zatížení/naložení.

Cílem práce je prozkoumat trakční možnosti tramvaje tatra T3 pro přepravu kontejnerů s SKO.

Abstract

The theme of my bachelor thesis was connected with the project for the transport and processing of mixed municipal waste (hereinafter referred to as SKO), which started under the optional subject of Engineering Design IV.

My bachelor thesis deals with the traction mechanics of the set of tram T3. The modification of the tram consists in the creation of a freight wagon capable of transporting municipal waste, or other cargo, over the municipal rail network.

Mechanical calculations analyze multiple types of wiring. The individual kits are always analyzed for the assumed full load.

The aim of this work is to investigate traction possibilities of Tatra T3 tram for transport of containers with SKO.

OBSAH

1	ÚVOD.....	10
1.1	Vize bakalářské práce	10
1.2	Analýza současného stavu a problematiky	10
2	REŠERŠE NAKLADNÍCH TRAMVAJÍ VE SVĚTĚ	12
2.1	CarGo Tram Dresden	12
2.2	T3 – mazací vůz Praha	13
2.3	T3 – nákladní vůz Lvov.....	14
2.4	E-Tram Zurych	14
3	VLASTNOSTI TRAKČNÍ MECHANIKY KOLEJOVÝCH VOZIDEL	15
3.1	Trakční charakteristika	15
3.2	Omezující křivky trakční charakteristiky	15
4	HODNOCENÍ TRAKČNÍ MECHANIKY SOUPRAV TRAMVAJOVÝCH VOZŮ.....	18
4.1	Stanovení trakční charakteristiky vozu T3.....	18
4.1.1	Hmotnostní analýza nákladní tramvaje T3.....	20
4.1.2	Stanovení nápravového zatížení	21
4.2	Varianta 1 – souprava T3 + T3.....	23
4.2.1	Hmotnostní bilance soupravy T3+T3.....	23
4.2.2	Sestavení trakční charakteristiky soupravy T3+T3	24
4.2.3	Analýza jízdního cyklu soupravy T3+T3 na 350 m jízdy při jízdě na přímé trati v rovinatých městech (20 %).....	28
4.2.4	Analýza jízdního cyklu soupravy T3+T3 na 350 m jízdy při jízdě do stoupání	31
4.2.5	Návrh dočasného přetížení motorů pro překonání stoupání soupravy T3+T3	33
4.2.6	Výpočet brzdné dráhy při klesání 80‰ soupravy T3+T3.....	35
4.3	Varianta zapojení 2 – souprava T3+N3+T3	37
4.3.1	Hmotnostní bilance soupravy T3+N3+T3	37
4.3.2	Sestavení trakční charakteristiky soupravy T3+N3+T3	37
4.3.3	Analýza jízdního cyklu soupravy T3+N3+T3 na 350 m jízdy při jízdě na přímé trati v rovinatých městech (20 %)	41
4.3.4	Analýza jízdního cyklu soupravy T3+N3+T3 na 350 m jízdy při jízdě do stoupání	42
4.3.5	Návrh dočasného přetížení motorů pro překonání stoupání soupravy T3+N3+T3	43
4.4	Varianta zapojení 3 – souprava T3+T3+T3.....	46
4.4.1	Hmotnostní bilance soupravy T3+T3+T3.....	46
4.4.2	Sestavení trakční charakteristiky soupravy T3+T3+T3	47
4.4.3	Analýza jízdního cyklu soupravy T3+T3+T3 na 350 m jízdy při jízdě na přímé trati v rovinatých městech (20 %)	49
4.4.4	Analýza jízdního cyklu soupravy T3+T3+T3 na 350 m jízdy při jízdě do stoupání	50
4.5	Varianta zapojení 4	52
5	ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ A KOMENTÁŘ.....	53
6	BIBLIOGRAFIE	54
7	SEZNAM OBRÁZKŮ	55

1 ÚVOD

1.1 VIZE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Tato práce nám analyzuje pouze výkonové vlastnosti vozu tatra T3. Při návrhu nové tramvaje je tento výpočet základním krokem pro celkový návrh tramvajové nákladní soupravy. V této práci je cílem výpočtu ověření správné mechaniky jízdy, již navržené soupravy. Detailnější konstrukční řešení není součástí této práce.

Tato práce je součástí projektu, který má za cíl zkvalitnit přepravu směsného komunálního odpadu (dále jen SKO) v Praze. Představa že velkou část silniční přepravy SKO nahradí tramvaj je velice zajímavá. Hlavní důvody jsou: menší zátěž pro městské ovzduší, dieselové kuka vozy nemusí najezdit takové vzdálenosti do spalovny Malešice. Přeprava bude tedy levnější ekologičtější. Mírně se zvolní zátěž silničních komunikací ve městě.

Představa tohoto projektu je taková, že vznikne několik překladišť SKO v Praze, ze kterých by se po kolejích svážel SKO do Spalovny Malešice.



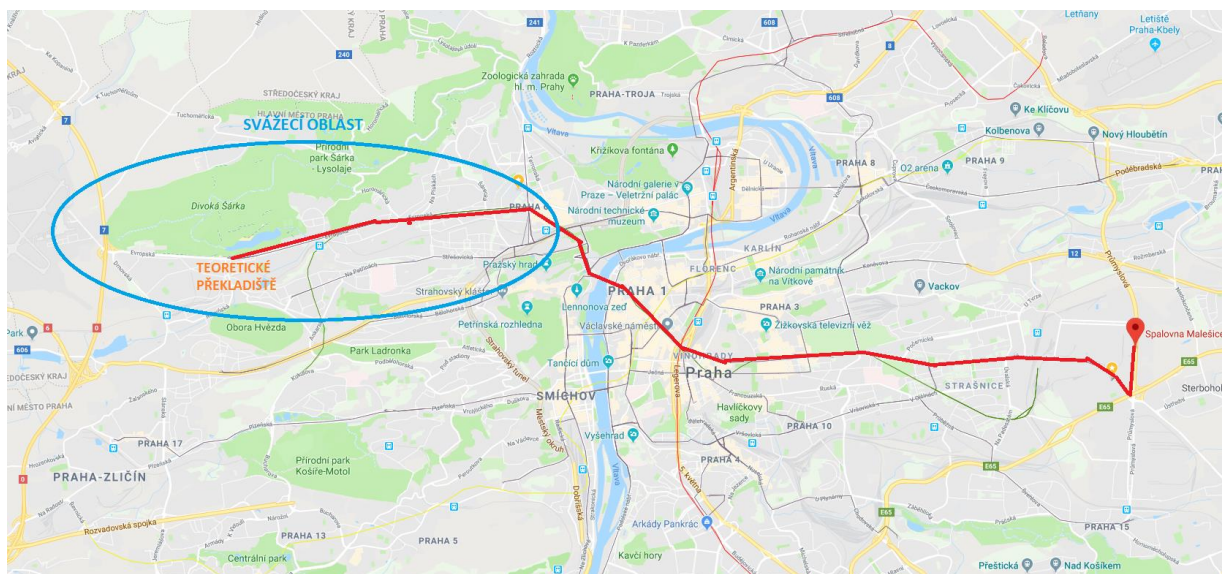
obr. 1 Spalovna Malešice [10]

1.2 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU A PROBLEMATIKY

Pro začátek trochu ujasním o co v celém projektu SKOTRANS jde. Pro názornost popíšu cestu SKO od popelnice ke zpracování.

K popelnici s SKO přijede speciální nákladní vůz na svoz odpadu z popelnic (označovaný jako kuka vůz). Doplním, že jde o nákladní vůz se vznětovým spalovacím motorem. Vůz postupně obsluha plně naloží a přijede na blízké překladiště. Celé překladiště je navrženo tak, aby se SKO co nejefektivněji přeložil na tramvaj v připravených kontejnerech. Z překladiště odveze tramvajová souprava SKO do spalovny Malešice, kde se SKO zpracuje. Případně by SKO mohl být svážen vlakem.

Z tohoto popisu je jasné, že nákladní automobil, kuka vůz, najede podstatně méně kilometrů, tedy vypustí méně zplodin, jako jsou oxidy dusíku NO_x (tzv. noxy) a další zdravý škodlivé látky. V oblasti zplodin dieselových motorů firma BOSCH snížila novou technologií o 92 % emise NO_x , než je současný legislativní limit (168 mg/km) [1]. Tuto technologii ale ještě dnešní nákladní vozy určitě nemají. Nesporná výhoda je samozřejmě, že ušetříme na provozu svázečích nákladních vozů, které jsou méně energeticky účinné.



obr. 2 Schématický popis svozu SKO po Praze (pro ilustraci)

Dopravní podnik hlavního města Prahy v současné době disponuje množstvím tramvají typu Tatra T3, které postupně nahrazuje novými modely. Je tu tedy myšlenka úpravy starých tramvají pro nákladní využití. Dopravní podnik hl. m. Prahy už podobnou úpravu uskutečnil v podobě mazací tramvaje 5572.

2 REŠERŠE NAKLADNÍCH TRAMVAJÍ VE SVĚTĚ

2.1 CARGO TRAM DRESDEN

K řešení této tramvaje jsem našel následující popis, cituji: „V současné době je velmi známou nákladní tramvají tzv. CarGoTram, tedy několika článková nákladní tramvaj, která zásobuje továrnu Volkswagenu, nacházející se přímo v centru Drážďan. Dovoz dílů do ní nákladními auty by byl v podstatě nemožný, a tak se společnost rozhodla právě pro tramvaj. Dohromady existují dva nákladní vozy, byly speciálně vyvinuty firmou Schalker Eisenhütte Maschinenfabrik GmbH Gelsenkirchen. Provozovány jsou ve čtyřicetiminutovém intervalu, poprvé tramvaj vyjela v roce 2000 [2].

Kromě Drážďan se ale o podobné koncepci uvažuje i v jiných městech (Víděň, Curych, Brno); hlavní výhodou nákladních tramvajů je jejich ekologičnost, nevýhodou pak však malá dostupnost a řídká kolejová síť – do každého závodu se v podstatě musí postavit zcela nový kus tratě [2].“



obr. 3 Tramvaj CarGoTram [2]

Technické informace CarGoTram [3]:

Nákladní tramvaj je navržena jako obousměrné vozidlo s řídicím vozidlem vpředu i vzadu. Všechny nápravy jsou poháněny. Do celé soupravy lze zapojit až tři nákladní vozy plus dva vozy řídicí. Takto zapojená souprava má nákladní prostor o velikosti 214 m³.



obr. 4 Pětídílný vlak nákladní tramvaje CarGoTram [3]

Maximální hmotnost nákladu na vagony:

2x	7,5 t	Řídící vagón
+3x	15 t	Prostřední vagony
	60 t	Hmotnost celkově

Výrobce:	Schalker Eisenhütte
Rok výroby:	2000
Rozchod kolejí:	1,450 mm
Šířka	2,200 mm
Rozvor kol podvozku:	1,900 mm
Hmotnost prázdné soupravy:	90,0 t
Maximální rychlost:	50 km/h
Hodinový výkon:	20x45 kW=900kW

tab. 1 Specifikace CarGoTram Zurich

2.2 T3 – MAZACÍ VŮZ PRAHA

Mazací tramvaj (zkráceně mazačka) v Praze je specificky upravený pracovní vůz, který od počátku roku 2015 slouží k mazání kolejnic v pražské tramvajové síti. Vůz byl vyroben roku 1965 jako běžný typ Tatra T3 a jezdil s cestujícími až do roku 1990. Pak prošel přestavbou na nákladní vůz, během níž byla zkrácena vozová skříň a v zadní části vytvořena nákladní plocha. Od roku 2004 navíc vůz disponuje sněžným pluhem, aby mohl odklízet sníh na trati na Barrandov v jižní části Prahy. V průběhu roku 2014 získala tramvaj zařízení pro mazání kolejí a s ním byla nasazena do téměř denního provozu. Stala se populárním fenoménem a byla osazena webovou kamerou, kterou lze sledovat na internetu. [4]



obr. 5 Mazací vůz T4 [4]

2.3 T3 – NÁKLADNÍ VŮZ LVOV

Přestavěná T3 na nákladní vůz je vidět na obrázku 6. Fotografie je ze Lvova na Ukrajině. [3]



obr. 6 Tatra T4 přestavěná na nákladní tramvaj ve Lvově

2.4 E-TRAM ZURICH

Od roku 2003 je v Zurychu v provozu E-tram na svoz objemného odpadu. Tato tramvaj sváží objemný odpad z centra města. E-Tram sváží také elektroniku a nebezpečný odpad. Tramvaj jezdí do města zhruba osmnáctkrát za měsíc. Služba je v Zurichu zdarma, jak je ve Švýcarsku u služeb tohoto typu zvykem. V Zurichu je v provozu 9 svážecích stanovišť, kde tramvaj postupně zastavuje a obsluha nakládá odpad. Tramvaje provozuje ERZ (Entsorgung und Recycling Zürich). [5]



obr. 7 Nákladní tramvaj v Zurichu [5]

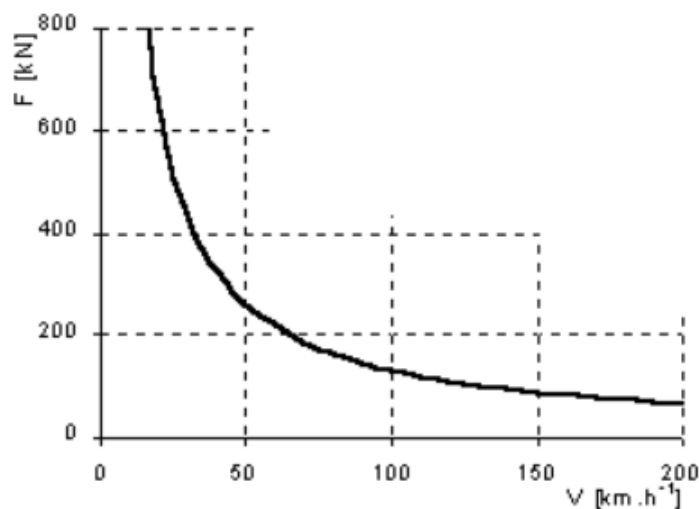
3 VLASTNOSTI TRAKČNÍ MECHANIKY KOLEJOVÝCH VOZIDEL

3.1 TRAKČNÍ CHARAKTERISTIKA

Trakční charakteristika je grafické zobrazení, které nám udává ucelený obraz proměnlivosti průběhu výkonu a tažné síly na obvodu hnacích kol v závislosti na rychlosti jízdy pomocí křivek v pravoúhlých souřadnicích s rovnoměrnými stupnicemi. Těmto křivkám říkáme trakční charakteristiky [6].

Tažná síla vozidla není konstantní v celém rozsahu rychlosti. Velikost a průběh této síly je jedním z rozhodujících parametrů ovlivňujících jejich nasazení do provozu. Graficky ji pak můžeme vyjádřit v souřadném systému $F - v$. Na osu svislou vynášíme tažnou sílu vozidla F , na osu vodorovnou pak rychlost vozidla v . Z hlediska energetického využití je nejvýhodnější, pokud vozidlo může využít plný výkon v celém rychlostním rozsahu. Z toho plyne závislost pro ideální průběh výkonu:

$$P = Fv = konst. \quad (1)$$



obr. 8 Ideální trakční hyperbola při $P=360$ kW

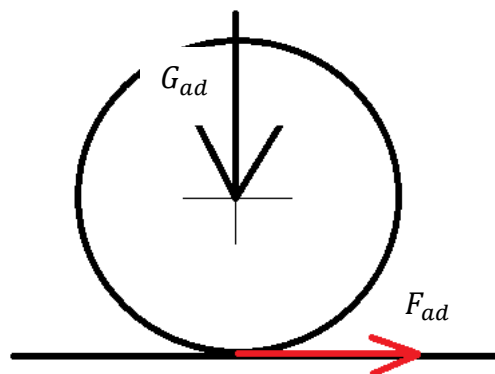
3.2 OMEZUJÍCÍ KŘIVKY TRAKČNÍ CHARAKTERISTIKY

Každé hnací vozidlo má specifické trakční vlastnosti, které jsou dány jeho konstrukcí. Konstrukce je omezena maximálním výkonem elektro motorů, legislativou, tj. povolenou maximální rychlostí, a fyzikou, tj. adhezí. Tvar trakční charakteristiky je tedy omezen těmito vlivy vyplývajícími z reálné konstrukce hnacího vozidla:

1. Adheze

Tažná síla na obvodu kol je součtem všech reakcí vznikajících na styku kola s kolejnicí, u kterých působí obvodová síla. Tato reakce vzniká na základě existence adheze, představující součinitel tření za relativního klidu dotykových ploch na styku kola s kolejnicí. Maximální sílu, kterou je možno za těchto podmínek realizovat nazýváme adhezní tažnou silou F_{ad} . Její velikost je závislá na kvalitě tohoto styku a svislé síle G_{ad} působící v tomto styku. Je tedy závislá na hmotnosti lokomotivy, přesněji na hmotnosti (tíze) připadající na hnané dvojkolí. Je dána vztahem:

$$F_{ad} = \mu_{ad} G_{ad} \varepsilon \quad (2)$$



obr. 9 Schéma kola tramvaje

kde:

μ_{ad} ... součinitel adheze
 G_{ad} ... adhezní tíha
 ε ... součinitel využití adheze

Pokud nastane situace:

$$F_{ad} < F_o \quad (3)$$

kde F_o tažná síla na obvodu kol

je porušena podmínka klidu stykových ploch a dojde k relativnímu pohybu mezi kolem a kolejnicí, kola prokluzují. Mezi styčnými plochami přestává působit adheze a začíná působit tření. Děje se tak díky tomu, že součinitel tření f_t je menší než součinitel adheze.

$$f_t < \mu_{ad} = f_o \quad (4)$$

V praxi se pro stanovení hodnoty součinitele adheze používají experimentálně stanovené vztahy a prokluz kola hlídá protiskluzová ochrana.

2. Výkon

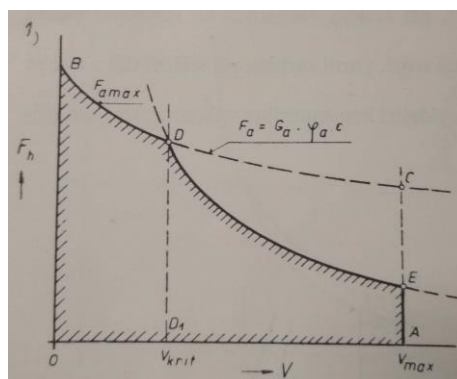
V oblasti rozjezdu, kdy je rozjezd vozidla omezen adhezí, je maximální dosažitelný výkon roven adhezní tažné síle. Toto omezení se projeví v okamžiku, kdy vozidlo překročí tzv. kritickou adhezní rychlost v_{kritad} (průsečík křivky F_{ad} a křivky konstantního výkonu P_{max}). V této oblasti jsem mohl využít pro provoz plného výkonu vozidla. Průběh této křivky se přibližuje k ideální trakční hyperbole. [6]

3. Maximální rychlost vozidla

Při dosažení maximální rychlosti musí být zrychlení vozidla teoreticky rovno nule.

4. Celkový odpor na vozidlo

Vozidlový odpor je odpor vozidla při jízdě po přímé vodorovné trati. Působí opačným směrem než tažná síla. Patří sem síly způsobené třením, a to: valivým třením mezi koly a kolejnicí, čepovým třením v nápravových ložiskách a odporem vzduchu při jízdě. Vozidlový odpor roste s rychlostí vozidla a je označován jako výběhová křivka.



obr. 10 Skutečná trakční charakteristika [6]

Výsledný odpor vozidla je součtem vozidlového odporu, traťového odporu (odpor ze sklonu, odpor z oblouku, odpor tunelu) a odporu ze zrychlení, který působí pouze, mění-li vozidlo svoji rychlost.

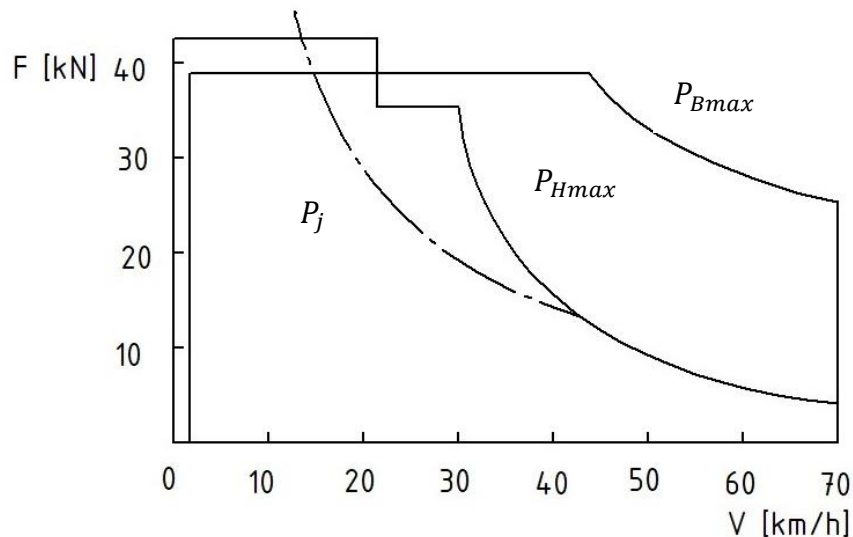
$$O = O_V + O_T + O_a \quad (5)$$

4 HODNOCENÍ TRAKČNÍ MECHANIKY SOUPRAV TRAMVAJOVÝCH VOZŮ

4.1 STANOVENÍ TRAKČNÍ CHARAKTERISTIKY VOZU T3

Toto je hlavní část této bakalářské práce. Zde jsem vypracoval analýzu mechaniky jízdy souprav s vozy Tatra T3. Analýza jsem vypracoval pro tři způsoby zapojení vozů, které jsou naloženy plným kontejnerem s SKO. Po každé analýze a výpočtech následuje vyhodnocení a závěry pro danou soupravu.

Pro tuto práci jsem bral vstupní hodnoty na základě parametrů tramvaje typu Tatra T3 SUCS. Řízení jízdy jsem odvozoval z tohoto grafu (z prospektu ČKD), tento graf jsem zakreslil pomocí programu Solid Edge do elektronické podoby.



obr. 11 Známa trakční charakteristika vozu T3R

V obr. 11 je doplněná křivka jmenovitého výkonu P_j tramvaje T3, která se od patrně „maximálního“ výkonu P_{Hmax} liší vcelku značně.

Konkrétní hodnoty řízeného hnacího výkonu P_{Hmax} a brzděného výkonu P_{Bmax} ze známé trakční charakteristiky:

V [km/h]	F [N]	P_{Hmax} [kW]
30	36 670	305,6
40	16 600	184,4
60	6 000	100
70	4 300	83,6

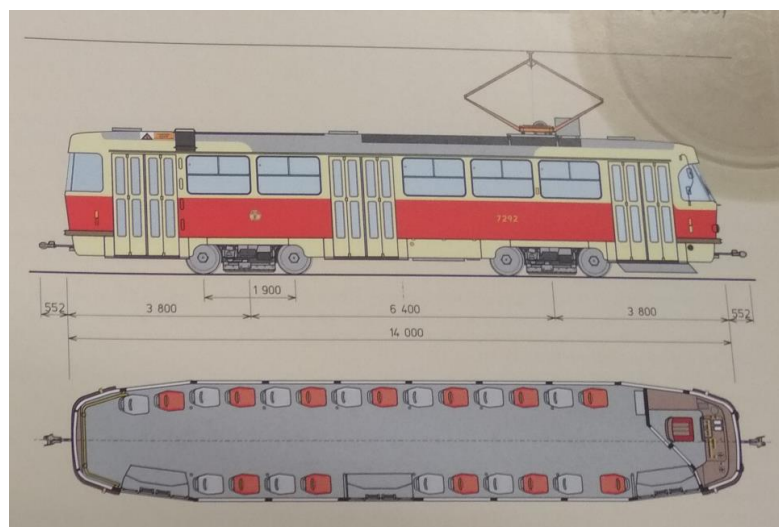
V [km/h]	F [N]	P_{Bmax} [kW]
44	38 800	305,6
50	33 200	184,4
60	28 000	100
70	25 000	83,6

tab. 2 vyčíslené výkony z obr. 11

Pro správnou analýzu jízdy je potřeba znát technické parametry tramvaje T3.

Základní technické údaje	Typ T3 SUCS	
Délka přes spřáhla	15104	mm
Délka vozové skříně	14000	mm
Šířka vozové skříně	2500	mm
Výška vozové skříně	3060	mm
Počet náprav/trakčních motorů	4/4	
Vzdálenost otočných čepů	6400	mm
Rozvor náprav	1900	mm
Průměr kol max/min	700/650	mm
Výkon motoru hodinový/trvalý	4x44/4x40	kW
Hmotnost prázdného vozu	16000	kg
Hmotnost plně obsazeného vozu	27400	kg
Maximální rychlost	65	km/h
Výška podlahy nad TK.	869	mm
Jízdní parametry:		
Max. zrychlení prázdného vozu	1,8	m/s ²
Provozní zpoždění prázdného vozu	1,8	m/s ²
Max. zpoždění prázdného vozu	2,3	m/s ²
Minimální poloměr kolejového oblouku	23	m

tab. 3 Technické údaje Tramvaj T3 SUCS



obr. 12 Boční pohled a řez kabinou [7]

Pro výpočty je třeba určit některé konstanty. Pro rovinná města zvolíme stoupání s tratě 20 ‰. Pro „opravdové“ stoupání jsem volil stoupání s 80 ‰ (což odpovídá maximálnímu stoupání v Praze). Účinnost kloubového hřídele η_{KL} a převodů $\eta_{př}$ jsou obecně známé návrhové konstanty. Měrný odpor valení p_f a součinitel rotačních hmot δ . Pro tramvaj je $\delta = 1,2$ a $p_f = 0,002$. Součinitel odporu vzduchu C_x budeme uvažovat 0,5 (pro kouli).

Vstupní hodnoty ke všem variantám zapojení:

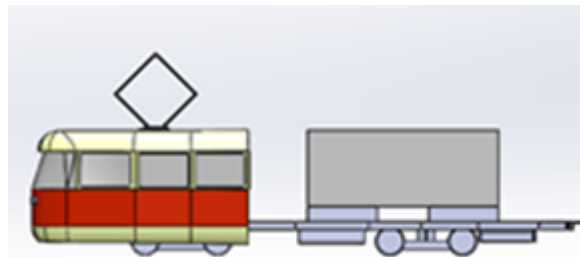
Výkon jednoho motoru	P_1	40	[kW]
Účinnost kloubového hřídele	η_{KL}	0,99	[1]
Účinnost nápravové převodovky	$\eta_{př}$	0,95	[1]
měrný odpor valení	p_f	0,002	[N/kN]
hustota vzduchu	ρ_v	1,29	[kg/m ³]
součinitel odporu vzduchu	C_x	0,5	[1]
čelní plocha soupravy	A	7,6	[m ²]
stoupání	s	80	‰
součinitel rotačních hmot	δ	1,2	[1]
adhezní součinitel	μ_{ad}	0,25	[1]

tab. 4 Vstupní hodnoty ke všem variantám zapojení

4.1.1 HMOTNOSTNÍ ANALÝZA NÁKLADNÍ TRAMVAJE T3

Vůz tramvaje T3 dopravní prostředek, který lze zjednodušit na symetrický, vážící 16 tun. Má dva trakční podvozky po dvou hnacích nápravách. Každá náprava nese přibližně stejné zatížení díky symetricky navrženému vozu.

Upravená tramvaj T3 již nemá symetrické rozložení hmoty v podélné ose, to vede k odlišným zatížením na jednotlivých nápravách (přesněji na předním a zadním podvozku) viz obr. 13.



obr. 13 Upravená tramvaj T3 na tažený koncový vůz, naloženo kontejnerem

Nastává tu problém s poháněním náprav, a především s brzděním. Původní tramvaj měla všechny nápravy poháněné stejně, ale upravená tuto výhodu využívat nemůže. Pokud by se nechaly všechny nápravy pohánět stejně, mohlo by docházet k prokluzu kol na zatíženějším podvozku. Tento nežádoucí prokluz by nastal v případě:

$$O > F_{ad-l} \quad (6)$$

kde:

O ... jízdní odpor

F_{ad-l} ... adhezní síla pod odlehčenějším podvozkiem

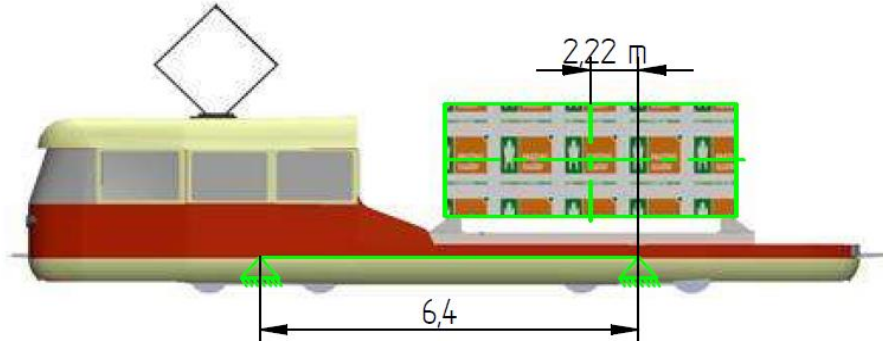
Stejný problém by nastal i u brzdění vozidla.

Počítal jsem tedy vždy s adhezní silou nejdlehčenějšího podvozku F_{ad-l} pro každý podvozek F_{ad} .

$$F_{ad-l} = F_{ad} \quad (7)$$

4.1.2 STANOVENÍ NÁPRAVOVÉHO ZATÍŽENÍ

Stanovím zatížení $2A_{min}$ odlehčenějšího podvozku. A_{min} je zatížení na nápravu. Na obr. 14 by to měl být podvozek vlevo, což ještě spočítám níže.



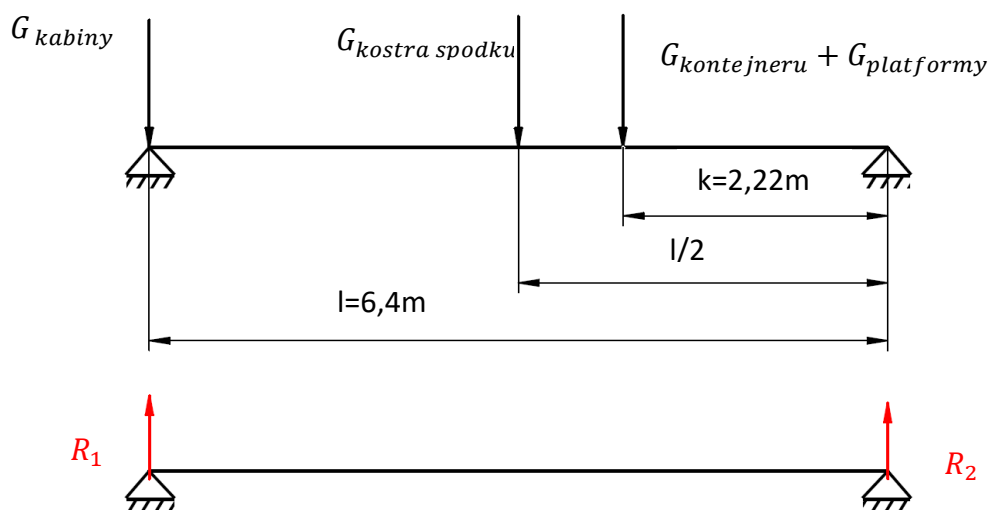
obr. 14 zavedení nosníku a poloha kontejneru na modelu upravené T3

Znám hmotnost kontejneru (hmotnost plného kontejneru je navržena v projektu SKOTRANS) $m_{kontejner}$, hmotnost platformy pro kontejner $m_{platformy}$, hmotnost podvozku $m_{podvozku}$, hmotnost původní T3 m_{T3} a hmotnost nosné části $m_{kostra\ spodku}$, která spojuje podvozky a nese kabinu a kontejner, $m_{kostra\ spodku}$ je zjištěná pomocí objemu modelu který vznikl v rámci předmětu Strojírenské konstruování IV. Jako první krok si vyjádřím hmotnost kabiny m_{kabiny} :

$$m_{kabiny} = \frac{m_{T3} - m_{kostra\ spodku} - 2m_{podvozku}}{2} = \frac{16\,000 - 2\,669 - 2 \cdot 3\,750}{2} \quad (8)$$

$$= 2\,915,5\,kg$$

Dále se zobrazí působící síly a jejich poloha. Na obr. 15 jsou zakresleny tíhové síly jednotlivých částí vozu a jejich poloha:



obr. 15 Schéma s polohou sil

Pomocí rozboru staticky určité úlohy vypočtu reakce v podporách (v podvozcích).
Statické rovnice rovnováhy:

$$y: G_{kabiny} + G_{kostra\ spodku} + (G_{kontejneru} + G_{platformy}) = R_1 + R_2$$

$$M: l \cdot G_{kabiny} + \frac{l}{2} G_{kostra\ spodku} + k \cdot (G_{kontejneru} + G_{platformy}) = l \cdot R_1$$

Vyjádření reakcí R_1 a R_2 z rovnic rovnováhy (dosazování v [kg] a [m] výsledek je vynásoben tíhovým zrychlením $g=9,81$):

$$R_1 = G_{kabiny} + \frac{1}{2} G_{kostra\ spodku} + \frac{k}{l} (G_{kontejneru} + G_{platformy}) = 2915,5 + \frac{1}{2} 2669 + \frac{2,22}{6,4} (15000 + 1500) = 9973 \text{ kg} \rightarrow \underline{\underline{97\ 835\ N}}$$

$$R_2 = G_{kabiny} + G_{kostra\ spodku} + (G_{kontejneru} + G_{platformy}) - R_1 = 2915,5 + 2669 + (15000 + 1500) - 9973 = 12112 \text{ kg} \rightarrow \underline{\underline{118\ 819\ N}}$$

Výpočet síly 2. A_{min} :

$$2. A_{min} = \min(R_1, R_2) + G_{podvozku} = R_1 + G_{podvozku} = 9973 + 3750 = 13723 \text{ kg} \rightarrow \underline{\underline{134\ 623\ N}}$$

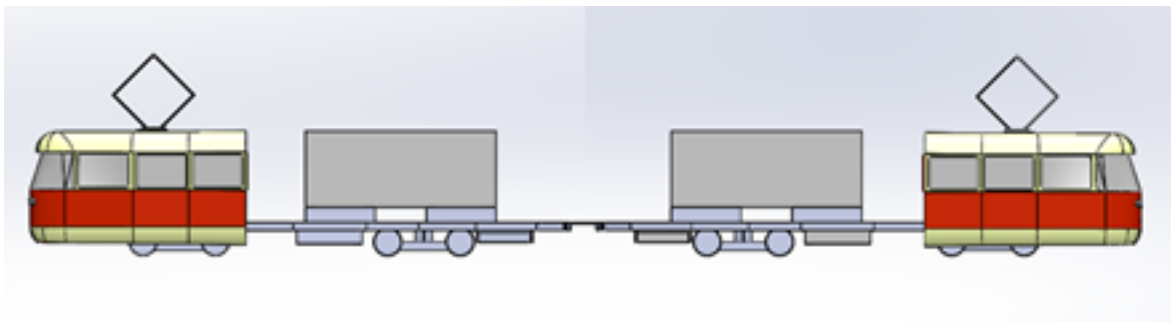
Sílu 2. A_{min} jsem zjišťoval pro stanovení adhezí síly F_{ad} . Tuto adhezí sílu F_{ad} jsem určoval pro každé zapojení soupravy samostatně, protože se bude lišit podle počtu podvozků.

4.2 VARIANTA 1 – SOUPRAVA T3 + T3

V této části se dostávám k samotnému jádru analýzy jízdy.

Dvou vozová souprava T3 + T3, tj. oba vozy jsou motorové = hnací. Na každém voze je naložen jeden kontejner, tj. souprava T3+T3 je naložena dvěma plnými kontejnery. Souprava je řízená podle nejméně zatíženého podvozku soupravy.

U této varianty zapojení se dá očekávat, že z hlediska jízdních vlastností by neměla mít problémy. Souprava veze dva kontejnery, což není zas až tolik výhodné z hlediska poměru množství nákladu k délce soupravy.



obr. 16 Schéma zapojení 1

4.2.1 HMOTNOSTNÍ BILANCE SOUPRAVY T3+T3

Výpočet hmotnosti plně naloženého koncového vozu T3:

Tato hodnota je potřebná pro další výpočty. Postupně sečtu jednotlivé hmotnosti. Za hmotnost kabiny m_{kabiny} jsem dosadil výše odvozený vztah, viz rovnice (8):

$$m_{v\u00fatz} = m_{kontejner} + m_{kostra\ spodku} + 2m_{podvozek} + m_{kabiny} + m_{platformy} \quad (9)$$

$$m_{v\u00fatz} = m_{kontejner} + m_{kostra\ spodku} + 2m_{podvozek} + \frac{m_{T3} - m_{kostra\ spodku} - 2m_{podvozek}}{2} + m_{platformy} \quad (10)$$

$$m_{v\u00fatz} = 15\,000 + 2\,669 + 2 \cdot 3\,750 + \frac{16\,000 - 2\,669 - 2 \cdot 3\,750}{2} + 1500 = \underline{29\,585\,kg}$$

4.2.2 SESTAVENÍ TRAKČNÍ CHARAKTERISTIKY SOUPRAVY T3+T3

Trakční charakteristika má několik částí, jak jsem popsal výše v kapitole 3.2:

Rozjezd

a) Adhezní část:

Adhezní část je rozhodující na počátku rozjezdu tramvaje, kde se výsledná hnací síla F_K rovná maximální síle adhezní F_{ad} a postupně narůstá trakční výkon soupravy.

Jelikož hnací vůz není souměrný, musíme maximální adhezní sílu hledat pod nejméně zatíženým podvozkem. Adhezní sílu bereme čtyřikrát, protože máme čtyři podvozky v soupravě, které řídíme stejně jako nejdlehčenější podvozek. Vycházel jsem z této rovnice pro adhezi kola vůči kolejnici:

$$F_{ad} = 4 \cdot 2 \cdot A_{min} \cdot \mu_k = 4 \cdot 82\,366 \cdot 0,25 = \underline{82\,366\,N} \quad (11)$$

μ_k ... adhezní součinitel

$2 \cdot A_{min}$... tíhová síla působící méně zatíženými podvozky soupravy

b) Výkonová část:

Maximální výkon tramvaje je řízen uměle, nikoliv podle jmenovitého výkonu elektrických motorů. Tento navržený průběh jsem modeloval podle grafu, viz obr. 11. Kde jsem odečetl několik hodnot řízené hnací síly $F_{př}$ pro jeden osobní vůz a tyto hodnoty jsem aproximoval mocninou funkcí pomocí programu Excel. Jednotlivé hodnoty $F_{př}$ jsou vynásobené dvěma, pro celou soupravu T3+T3. Jejich velikost dokumentuje tabulka tab. 5.

$F_{př}[N]$	$V [km/h]$
8 600	70
12000	60
33200	40
73340	30

tab. 5 Upravené body z obr. 11

Mocninná funkce průběhu řízené hnací síly soupravy: ¹⁾

$$F_{př} = 4 \cdot 10^8 \cdot V^{-2,535} \quad (12)$$

¹⁾ **Pozn.:** Průběh jmenovitého výkonu by se zapsal touto závislostí:

$$P_{j8} = F \cdot V$$

$$P_{j8} = 8 \cdot P_1 \eta_{KL} \eta_{př}$$

Kde: P_{j8} ... jmenovitý výkon osmi motorů; P_1 ... jmenovitý výkon trakčního motoru; η_{KL} ... účinnost kloubového hřídele; $\eta_{př}$... účinnost nápravové převodovky

Z obr. 11 jsem získal informaci o tom, jak je T3 řízená v provozu. Já ovšem budu ještě omezovat výkon motorů na jejich jmenovitou hodnotu, abych posléze mohl posoudit, jak moc by se musely motory přetěžovat pro požadované parametry jízdy. Síla ze jmenovitého výkonu F_{Pj} , bude odpovídat počtu motorů v soupravě.

Jmenovitý výkon:

$$F_{Pj} = \frac{P_j}{v_o} = \frac{8 * 40}{v_o} = \frac{320}{v_o} \quad (13)$$

Kontrola maximálního výkonu:

$$F_{HP} = \min(F_{Př}; F_{Pj}) \quad (14)$$

kde:

F_{HP} ... výsledná hnací síla z výkonu motorů

$F_{Př}$... odečtená řízená hnací výkonová síla

F_{Pj} ... hnací síla ze jmenovitého výkonu

v_o ... okamžitá rychlost

P_j ... jmenovitý výkon

Vedle průběhu hnací síly je důležité stanovit velikost celkového odporu soupravy.

c) Průběh jízdních odporů:

Pro moje zadání sestavím vztah pro celkový odpor soupravy. Budu vycházet z obecného vztahu, který platí pro všechny vozidla. :

$$O = O_s(v) + O_T(v) + O_a(v, a) \quad (15)$$

kde:

O ... celkový jízdní odpor

O_s ... odpor soupravy

O_T ... odpor tratě

O_a ... setrvačný odpor ze zrychlení

Teď si do vztahu dosadím konkrétnější druhy odporů, které budu uvažovat. Jednotlivé závorky, odpovídají jednotlivým odporům:

$$O = (O_f + O_{vzd}) + (O_\alpha) + (O_a) \quad (16)$$

kde:

O_f ... odpor valení

O_{vzd} ... odpor vzduchu

O_α ... odpor sklonu tratě

Nyní si za odpory dosadím empirické vztahy, které se běžně používají. Odpor zrychlení $O_a(v, a)$ zde není, dopočítává se z měnící se hnací síly a hmotnosti soupravy. Výsledná rovnice průběhu jízdního odporu soupravy je:

$$O(v) = (O_f + O_{vzd}) + (O_a) = (m_s \cdot g \cdot p_f + \frac{1}{2} \rho_v \cdot C_x \cdot A \cdot v^2) + (s \cdot m_s \cdot g) \quad (17)$$

kde:

m_s ... hmotnost naložené soupravy

p_f ... měrný odpor valení

ρ_v ... hustota vzduchu

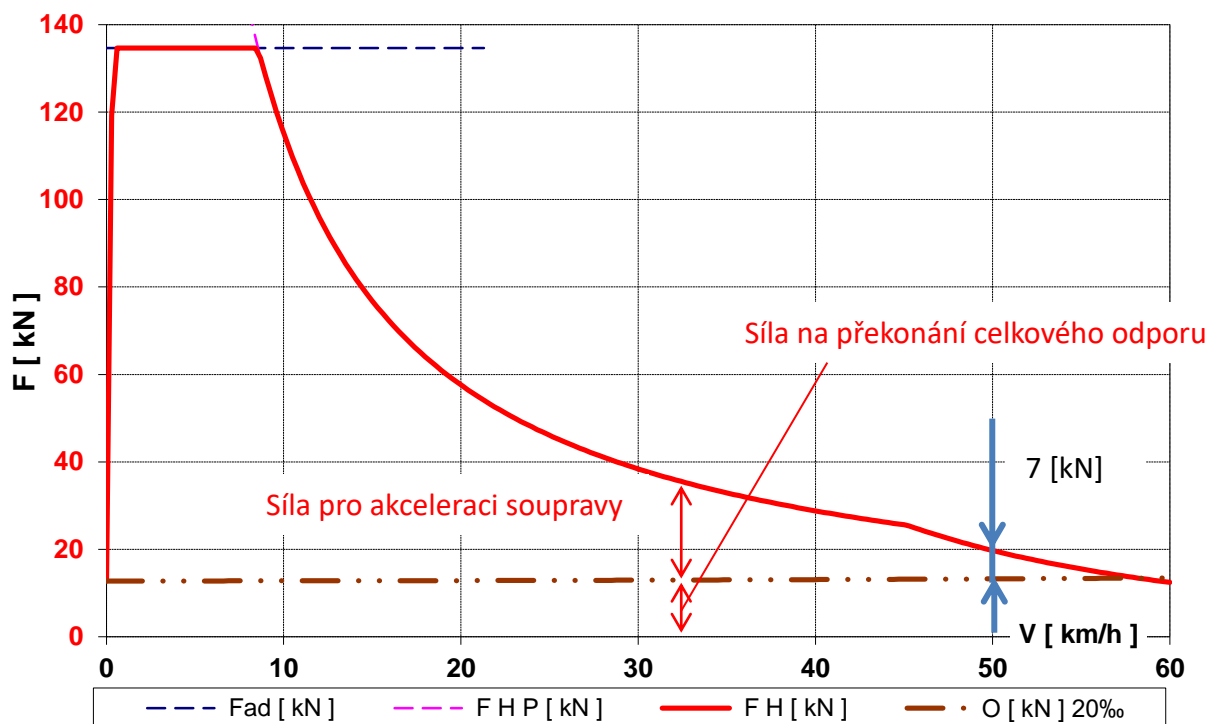
C_x ... součinitel odporu vzduchu

A ... čelní plocha soupravy

s ... stoupání

Nyní mám vše pro zobrazení rozjezdové části jízdy. Výsledná reálná hnací síla je jako červená čára FH. Odpor jízdy je vykreslen při stoupání 20‰, které uvažuji pro rovinatá města.:

Trakční charakteristika rozjezdu soupravy T3+T3



obr. 17 Rozjezdová trakční ch.T3+T3 (rovina)

Na obr. 17 se maximální rychlost se nachází v průsečíku křivky odporů O a hnací síly F_H . Maximální dosažitelná rychlost je v tomto případě někde kolem 58 km/h, což je postačující podmínka k provozu soupravy, protože maximální povolená rychlost tramvaje v denním pouličním provozu je 50 km/h, v nočních hodinách je z důvodu omezení hluku

snížena rychlost jízdy na 40 km/h. Z grafu, viz obr. 17, je dobře vidět chování hnací síly se změnou rychlosti. Při rozjíždění má souprava při rychlosti 50 km/h a stoupání 20‰ akcelerační sílu cca 7 kN, na obr. 17 je to modrá kóta.

Brzdění

Brzdění vozidla z pohledu trakční mechaniky funguje v principu stejně jako rozjezd, avšak brzdná síla působí opačný směrem a v trakční charakteristice se na ose rychlostí pohybují zprava doleva, tj. ve čtvrtém kvadrantu trakční charakteristiky viz obr. 18. Klesá mi tedy rychlost.

a) Adhezní část:

Adhezní část brzdění je poslední fáze těsně před úplným zastavením vozidla. Bude platit podobný vztah jako při rozjezdu. Tady ale musím uvažovat pro brzdění celou hmotnost soupravy, ne jen zatížení na odlehčenějších podvozcích.

$$F_B = 2 * m_{PV} * g * \mu_{DVB} * \eta_{DVB} \quad (18)$$

kde:

F_B ... brzdná síla

m_{PV} ... hmotnost plného vozu

μ_{DVB} ... součinitel adheze brzdny

η_{DVB} ... součinitel využití adhezní tíhy

b) Řízená část:

Před adhezní částí je, podobně jako u rozjezdu, část výkonová. Tentokrát jde ale o brzdny výkon. Způsob brzdění před adhezní rychlostí jsem také uvažoval podle obr. 11.

Odečtené hodnoty pro 1. případ. Zde jsou jednotlivé hodnoty brzdny síly F_{HP} již vynásobené dvěma, abych měl brzdny sílu pro celou soupravu.:

F_{HP} [kN]	V [km/h]
50	70
56	60
66,4	50
77,6	44

tab. 6 Upravené body z obr. 11

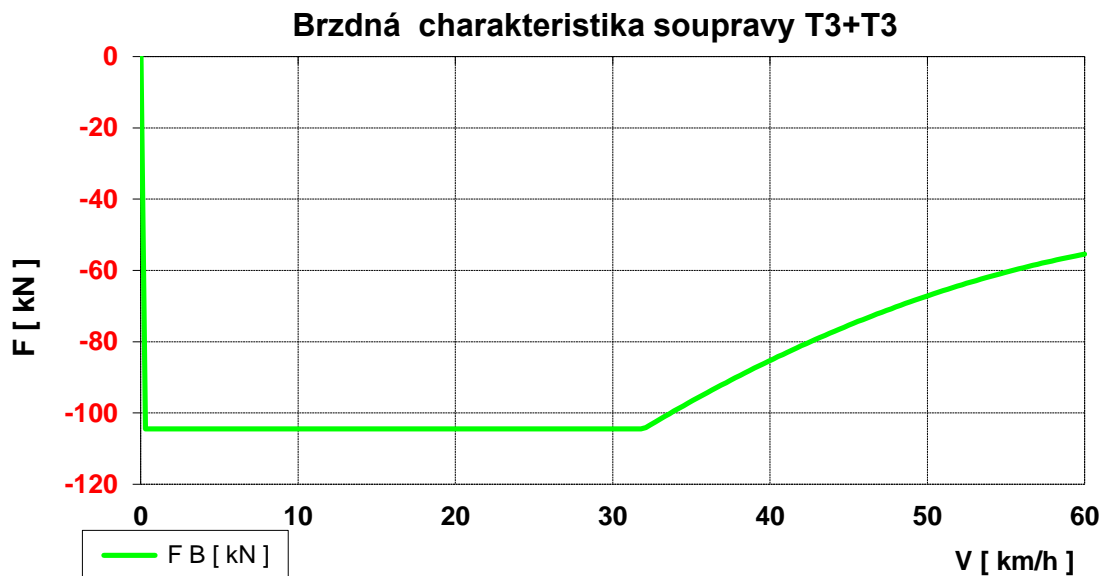
Tyto body jsem aproximoval polynomem druhého stupně, abych získal empirický vztah pro naši soupravu:²⁾

$$F_{BP} = 32,123V^2 - 4703,2V + 221996 \quad (19)$$

²⁾ Pozn:

Při návrhu brzdny síly by vycházelo z tohoto vztahu: $F_B = \frac{P_{Bmax}}{\eta_{přenosu\ výkonu} * v}$

Brzdná charakteristika by tedy vypadala takto:



obr. 18 Brzdná ch. T3+T3 (rovina) přiložený Excel

Z grafu na obr. 18 je vidět, že při rychlosti 31 km/h přechází výkonová část na adhezní část brzdění. S touto znalostí trakční charakteristiky mohou přistoupit k analýze jízdního cyklu soupravy Cargo Tram T3+T3.

4.2.3 ANALÝZA JÍZDNÍHO CYKLU SOUPRAVY T3+T3 NA 350 M JÍZDY PŘI JÍZDĚ NA PŘÍMÉ TRATI V ROVINATÝCH MĚSTECH (20 ‰)

Pro přímou dráhu dlouhou 350m jsem vytvořil model pohybu soupravy. Budu tedy souběžně zaznamenávat rychlost, dráhu a čas. Samozřejmě odpor ze stoupání bude nulový.

Určení chování rychlosti v zrychlení a během jízdy na dráze s :

Mezi dráhou, rychlostí a zrychlením platí tento vztah:

$$a = \frac{d(v^2)}{2 ds} \quad (20)$$

Budu počítat hodnoty s krokem rychlosti $\Delta v=0,35\text{km/h}$ od 0 do 60 km/h. Úpravou a integrací jsem získal vztah pro výpočet dráhy ujeté za krok rychlosti Δv :

$$\Delta s = \frac{1}{2a} \int_{v_1^2}^{v_2^2} d(v^2) = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a} \quad (21)$$

Aby mi tento postup fungoval, musel jsem vždy dosadit okamžité zrychlení. Pro určitou hnací sílu F_K vyvíjenou soupravou vypočtu hodnoty zrychlení pro rozsah rychlostí od 0 do 60 km/h při rozjezdu. Určím závislost zrychlení na síle:

$$a = f(F) \quad (22)$$

Rozejzd

Působící síla F se, jak vím, během rozejzdu mění. V první fázi je dána adhezní silou, později dosáhne-li součin $F \cdot v = P$ hodnotu maximálního výkonu, začne hnací síla s rostoucí rychlostí hyperbolicky klesat. Velikost okamžitého zrychlení lze vyjádřit obecným vztahem:

$$a_x = \frac{\min\left\{F_{ad}, \frac{P_{OK}}{v}\right\} - O(v)}{m_{redukovaná}} = \frac{\min\left\{F_{ad}, \frac{P_{OK}}{v}\right\} - O(v)}{m_S \cdot \delta} \quad (23)$$

Zrychlení při adhezním rozejzdu:

$$a_{x1} = \frac{F_{ad} - O(v)}{m_S \cdot \delta} \quad (24)$$

Zrychlení při výkonové části:

$$a_{x2} = \frac{\frac{P_{OK}}{v} - O(v)}{m_S \cdot \delta} \quad (25)$$

δ ... součinitel rotačních hmot

P_{OK} ... okamžitý výkon

Brzdění

Pro brzdnou část se pohyb bude chovat podobně jako pro rozejzd ovšem vstupní síly jsou jiné.

$$a_{xB} = \frac{\max\{F_{BP}, F_{BK}\} + O(v)}{m_{redukovaná}} = \frac{\max\{F_{BP}, F_{BK}\} + O(v)}{m_S \cdot \delta} \quad (26)$$

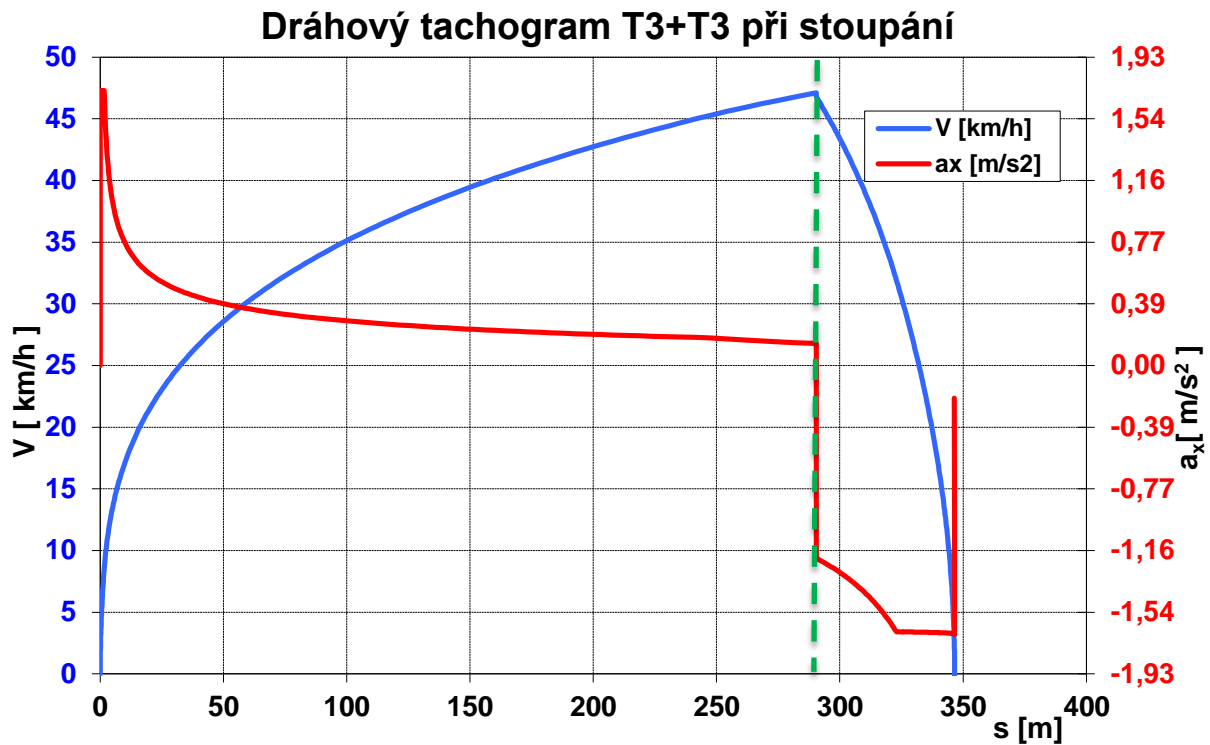
Brzdění při konstantní (adhezní) brzdě síle:

$$a_{xB1} = \frac{F_{BK} + O(v)}{m_S \cdot \delta} \quad (27)$$

Brzdění při výkonové části:

$$a_{xB2} = \frac{F_{BP} + O(v)}{m_S \cdot \delta} \quad (28)$$

Nyní lze tímto způsobem vytvořit grafickou závislost rychlosti a zrychlení na dráze:



obr. 19 Dráhový tachogram T3+T3 (rovina)

V grafu na obr. 19 je zelenou čárkovanou čarou vyznačeno místo, kde souprava musí začít brzdit. Je to na vzdálenosti $s=288$ m z rychlosti 48 km/h.

Chování rychlosti v a zrychlení a v čase t

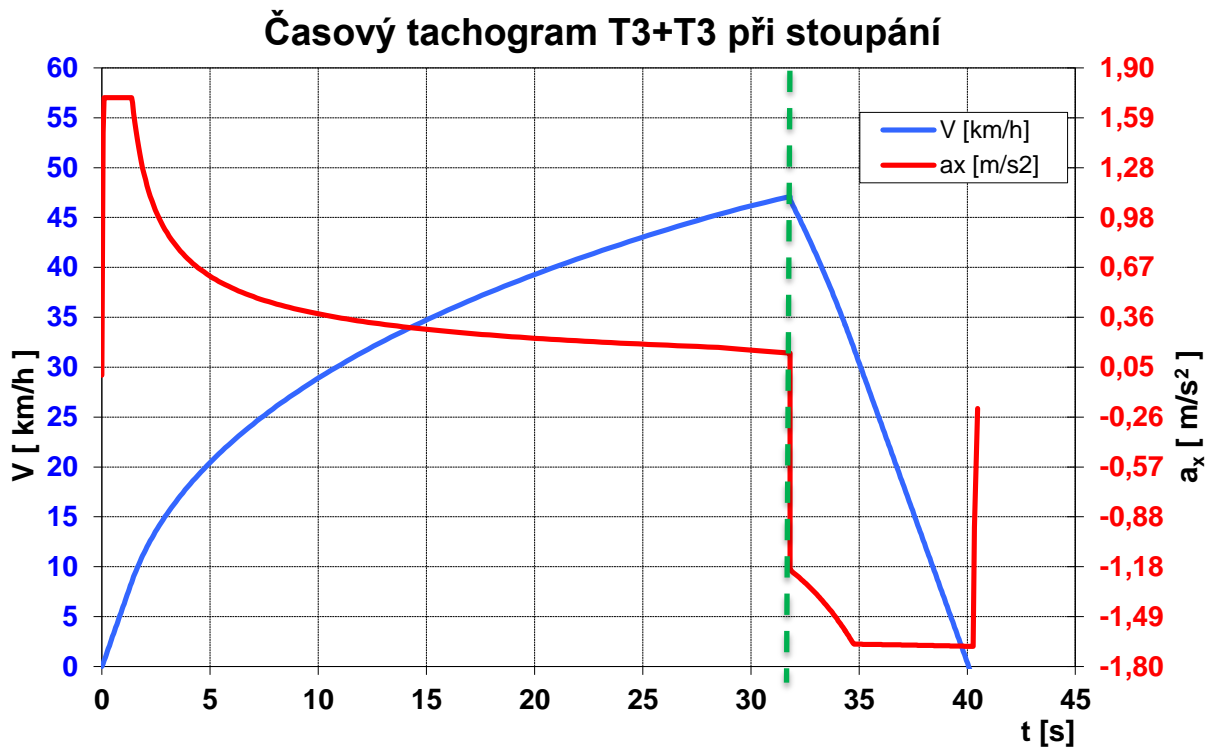
V mechanice je zrychlení definováno takto:

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (29)$$

Úpravou a integrací jsem získal vztah pro výpočet uplynulého času za krok Δv .

$$\Delta t = \frac{1}{a} \int_{v_1}^{v_2} dv = \frac{v_2 - v_1}{a} \quad (30)$$

Zrychlení budu dosazovat stejně jako pro Dráhový tachogram obr. 19. Mohu tedy graficky zobrazit průběh rychlosti a zrychlení v čase.:



obr. 20 Časový tachogram T3+T3 (rovina)

V grafu na obr. 20 je čárkovanou zelenou čarou vyznačeno místo, kde začíná souprava brzdit. Je to někde kolem 31s po rozjezdu. Dále je vidět chování rychlosti a času. Celou dráhu ujede za 40s.

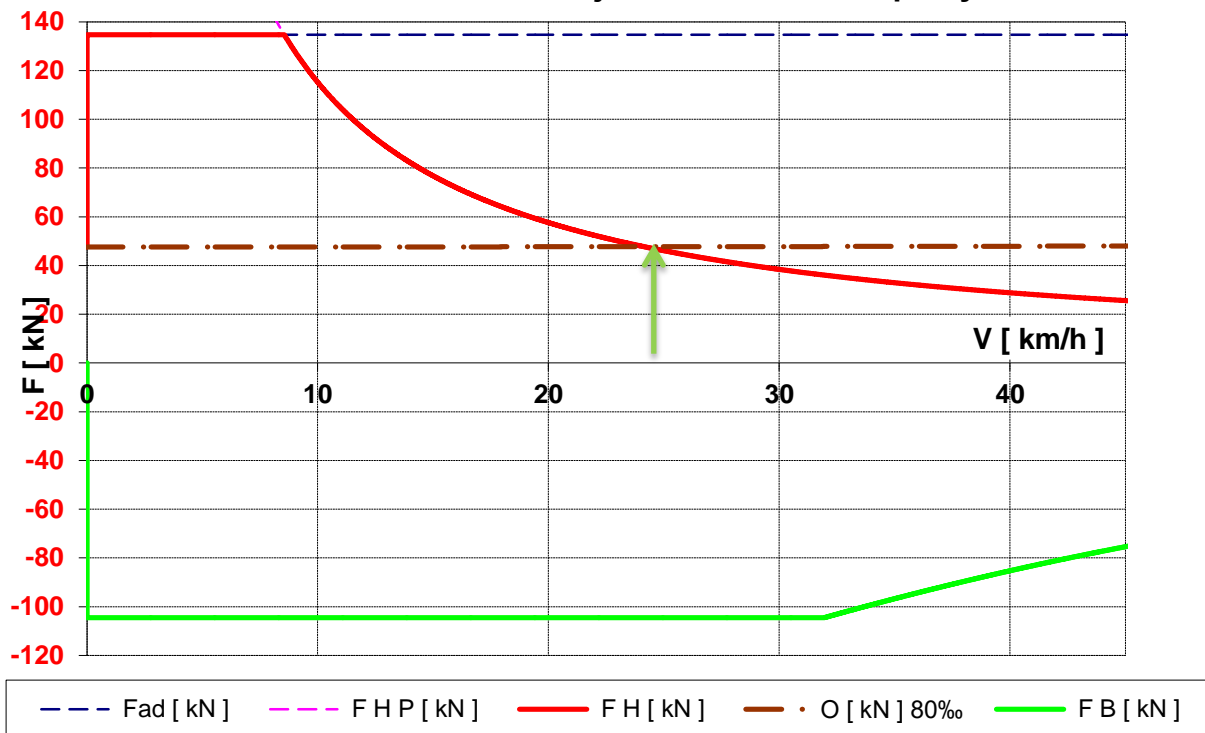
4.2.4 ANALÝZA JÍZDNÍHO CYKLU SOUPRAVY T3+T3 NA 350 M JÍZDY PŘI JÍZDĚ DO STOUPÁNÍ

Výpočet bude stejný jako při jízdě po rovině, jenom k vozidlovému odporu připočítám odpor ze stoupání. S ohledem na profil tramvajových tratí v Praze jsem zvolil maximální stoupání $s = 80 \text{ ‰}$.

$$O_a = sm_s g = 0,08 * 56\,170 * 9,81 = \underline{44\,082\,N} \quad (31)$$

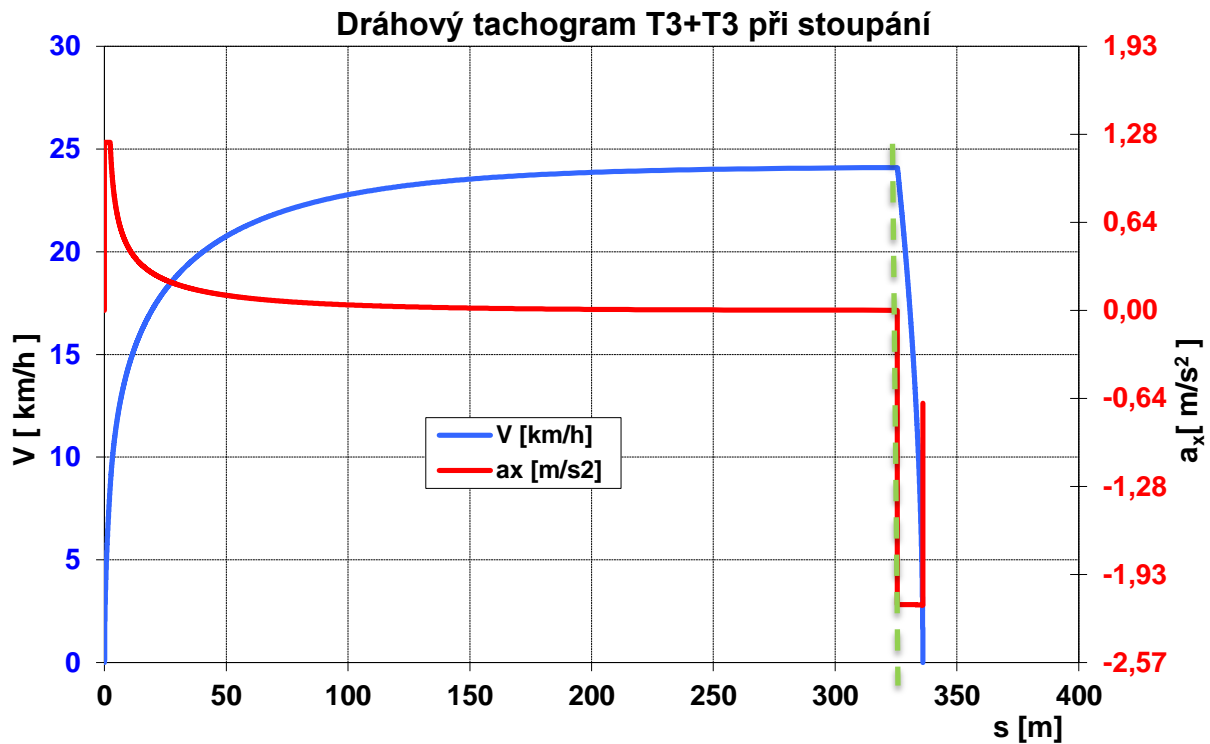
V trakční charakteristice se mi mění pouze křivka celkového odporu. Při jízdě do stoupání 80‰ maximální rychlost klesla na $V = 24 \text{ km/h}$. Zelená šipka ukazuje místo maximální rychlosti na obr. 21.

Trakční charakteristika rozjezdu i brždění soupravy T3+T3

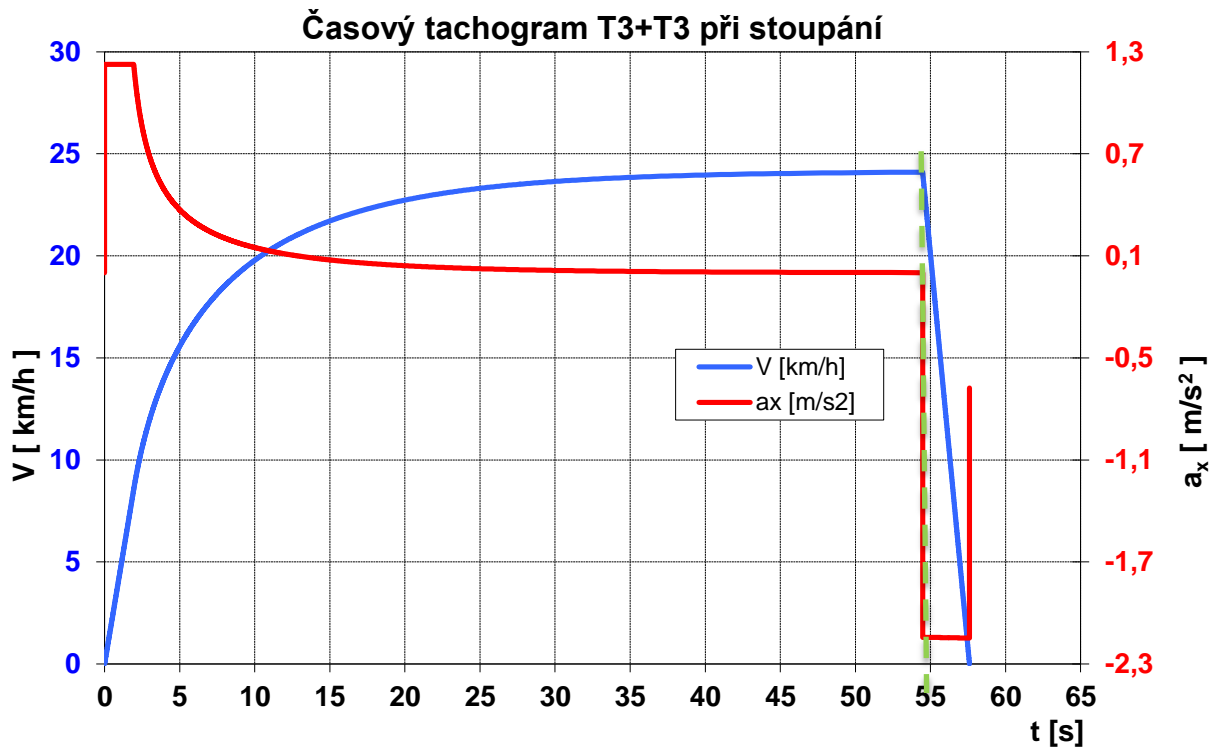


obr. 21 Rozjezdová a brzdňá trakční ch.T3+T3 (stoupání) přiložený Excel

V dráhovém (obr. 22) a časovém (obr. 23) tachogramu je vidět, že se na dráze 350 m dokáže souprava dostat při jmenovitém výkonu na 24 km/h a zvládne se rozjet a zastavit za 57 s. Maximální výkon soupravy odpovídá jmenovitému výkonu trakčních motorů, tj. $8 \times 40 = 320$ kW.



obr. 22 Dráhový tachogram T3+T3 při stoupání



obr. 23 Časový tachogram T3+T3 při stoupání

Z pohledu mechaniky jízdy by tato souprava nesplňovala jízdní vlastnosti v pražském prostředí. Do stoupání 80 ‰ si souprava T3+T3 nevede dobře. Musíme proto navrhnout dočasné přetížení motorů nad jmenovitý výkon P_j při jízdě do stoupání 80 ‰.

4.2.5 NÁVRH DOČASNÉHO PŘETÍŽENÍ MOTORŮ PRO PŘEKONÁNÍ STOUPÁNÍ SOUPRAVY T3+T3

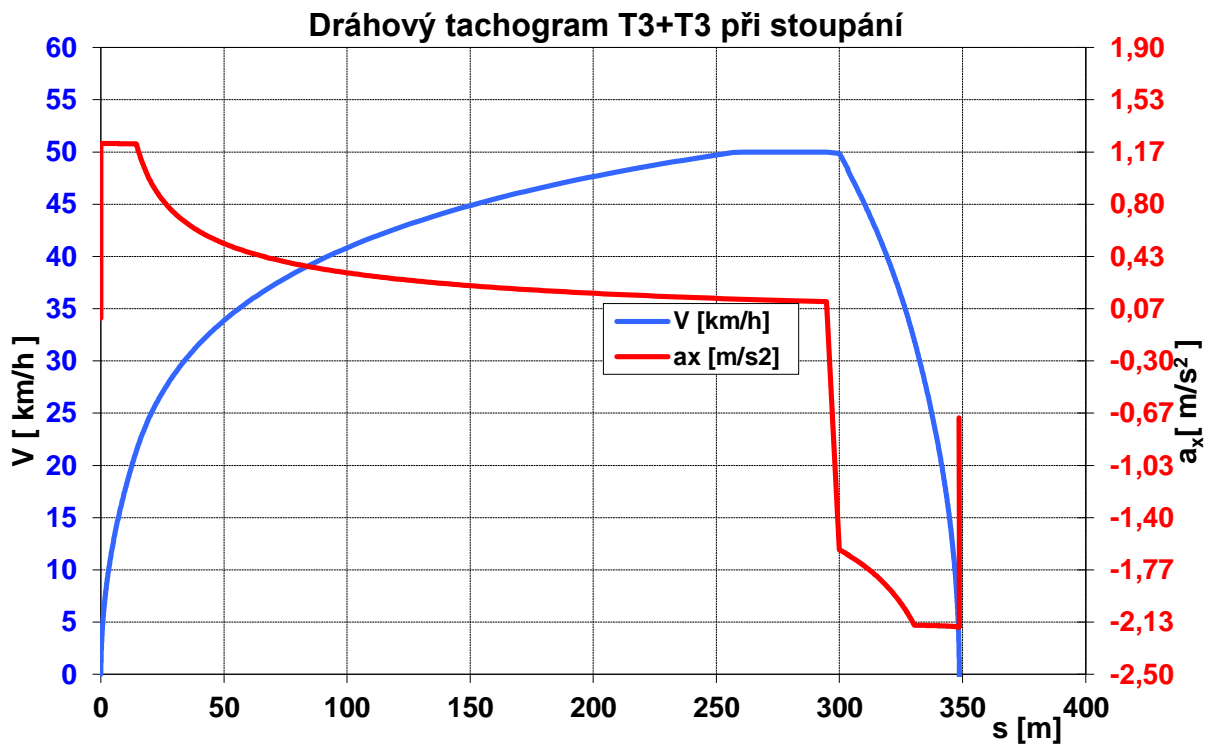
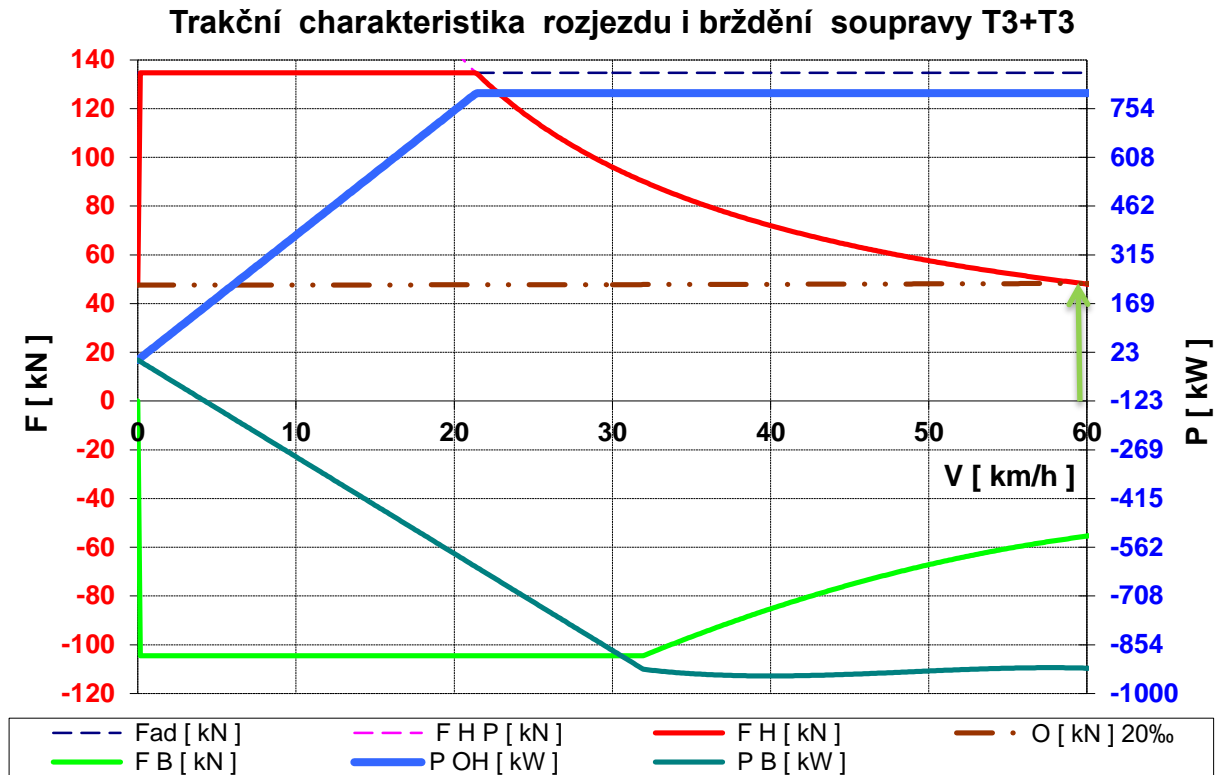
Pro překonání stoupání 80 ‰ bude potřeba zatížit motory nad jejich běžný provozní jmenovitý výkon.

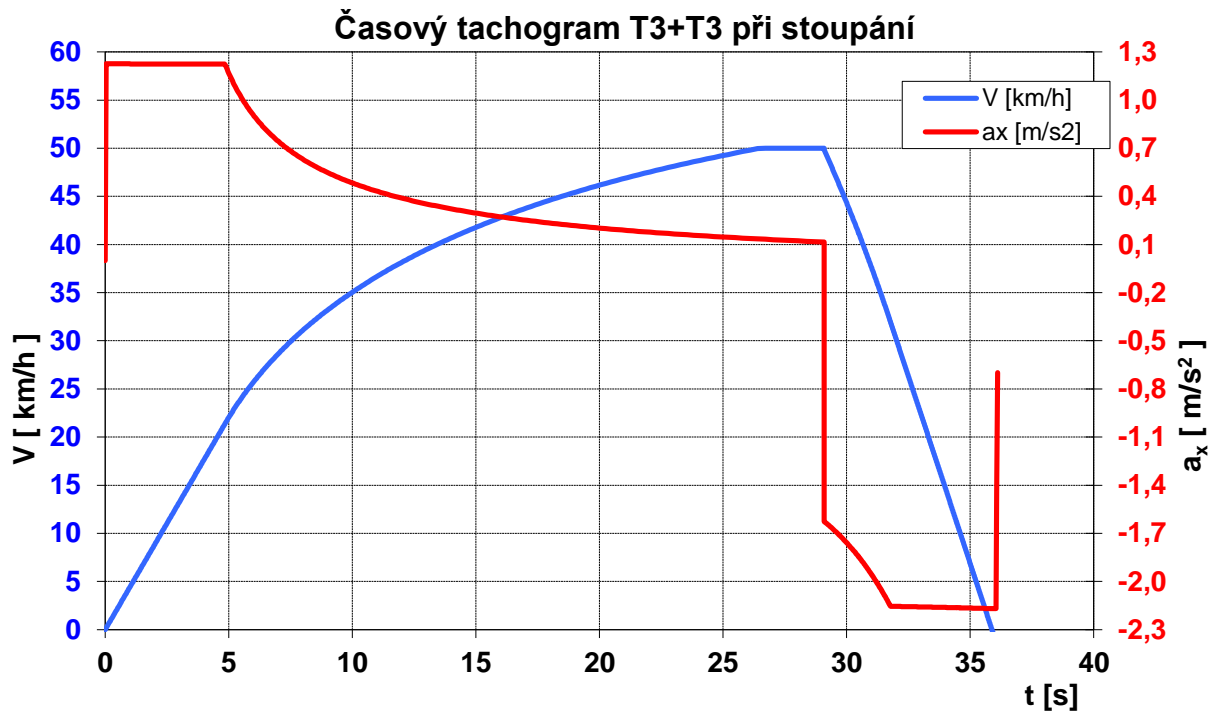
$$\text{Hodnota jmenovitého výkonu T3+T3: } P_j = 8 * 40 = 320 \text{ kW}$$

$$\text{Návrh navýšeného výkonu: } P_p = 2,5 * P_j = 800 \text{ kW}$$

Návrh přetížení jsem navrhl tak, aby souprava mohla stoupat rychlostí $V = 50 \text{ km/h}$ s mírnou rezervou hnací síly pro další zrychlení, viz obr. 24, jinak by se rozjížděla příliš dlouho na danou rychlost 50 km/h.

Výsledky:





obr. 26 Časový tachogram T3+T3 (stoupání, při přetížení)

Při takto navrženém výkonu 800 kW je vidět, že souprava dokáže jet až 60 km/h což ukazuje zelená šipka na obr. 24. Souprava Gargo tramvaj T3+T3 zvládne na přímé dráze dlouhé 350 m dosáhnout 50 km/h a zastavit, viz obr. 25. Na 350 m se rozjede a zastaví za cca 36 s, viz obr. 26.

4.2.6 VÝPOČET BRZDNÉ DRÁHY PŘI KLESÁNÍ 80‰ SOUPRAVY T3+T3

Postup výpočtu je stejný jako při jízdě do stoupání, jenom jsem změnil znaménko u odporu ze stoupání v rovnici (17). Brzdí se při klesání 80‰. Pokud se naložená souprava rozjede z kopce a při dosažení 50 km/h začne brzdit tak dokáže zastavit na 157 m podle obr. 27. Součinitel adheze uvažujeme $\mu_{ad} = 0,18$. Je tedy jasné, že při takovémto klesání nesmí jet souprava příliš rychle a v případě nutnosti zastavit zabrzdí nouzovými brzdami, které mají mnohem větší brzdnou plochu a tedy i brzdný výkon.

Zjednodušená kontrola brzdného výkonu motorů při klesání bez uvažování dalších jízdnic odporů jako je odpor vzduchu a odpor valení. Potřebný minimální návrhový výkon P_B' jsem určil pro brzdění z 50 km/h, více by se řidič neměl/nesmí ani rozjíždět. Skutečný brzdný výkon musí mít souprava rozhodně větší, hlavně z hlediska bezpečnosti.

$$P_B' = G * \sin \alpha * v = 59170 * 0,08 * \frac{50}{3,6} = 65\,744 \text{ W}$$

$$F_B = \frac{P_B'}{v} 3,6 = \frac{65\,744}{50} 3,6 = 4\,733 \text{ N}$$

Kontrola požadovaného součinitele adheze:

$$\mu_B = \frac{F_B}{G} = \frac{4\,733}{59\,170} = 0,08 < \mu_{požadované} = 0,15$$

kde:

P_B' ... návrhový brzdňý výkon

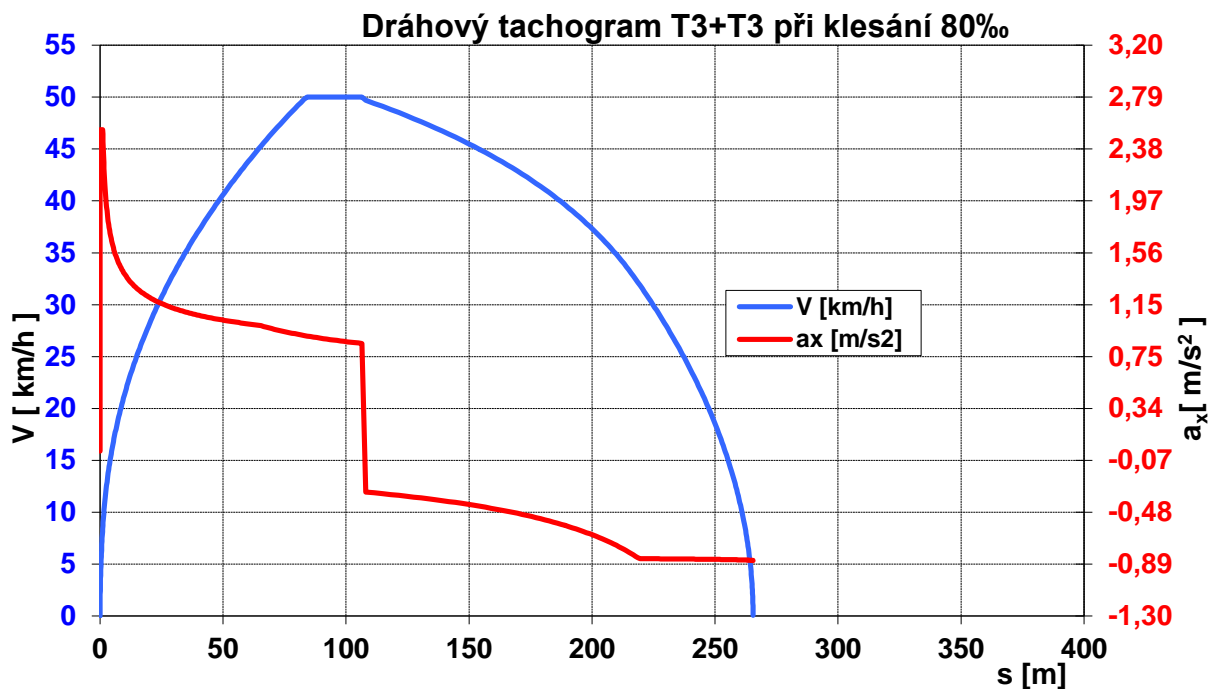
G ... tíhová síla soupravy

α ... úhel stoupání (zde klesání)

v ... maximální provozní rychlost soupravy

F_B ... brzdňá síla

Návrhový výkon P_B' vyšel zhruba 66 kW, to je cca 9x méně, než je reálný brzdňý výkon soupravy T3+T3. Velikost brzdňého výkonu viz tab. 2 na straně 18 s maximálními brzdňými výkony. Z této tabulky uvažuji největší hodnotu brzdňého výkonu. **Kontra** součinitele adheze vyšla pozitivně.



obr. 27 Dráhový tachogram T3+T3 (klesání 80‰)

Závěr varianty 1:

Souprava při jízdě po rovinatých městech nejeví problémy zrychlovat při jmenovitém výkonu. Do stoupání 80 ‰ bude potřeba pro rychlost $v=50\text{km/h}$ krátkodobě přetěžovat motory na 250% jmenovitého výkonu. Při klesání 80 ‰ může souprava sjíždět rychlostí až 50 km/h, aniž by došlo k překročení meze adheze a brzdňého výkonu.

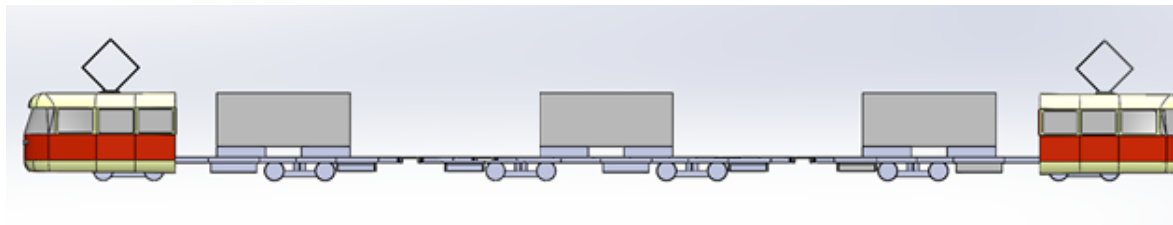
Proto jsem se v následující části zabýval otázkou, zda je možné vytvořit soupravu s vloženým vozem, a jaké budou její trakční a brzdňé vlastnosti. Vložený vůz by byl opatřen pouze mechanickými kotoučovými brzdami.

4.3 VARIANTA ZAPOJENÍ 2 – SOUPRAVA T3+N3+T3

V této části jsem analyzoval stejným způsobem jiné zapojení soupravy. Změnilo se mi několik parametrů pro výpočet. Některé výpočty jsou stejné, ne-li totožné, jako při zapojení 1 budu se tedy často odkazovat na zapojení 1 (T3+T3).

Tří vozová souprava. Přední a zadní vůz je tažný. Prostřední vůz je vlečný. Souprava je plně naložena třemi plnými kontejnery. Řízení tažné síly soupravy je podle nejméně zatíženého podvozku. Tento způsob rozmístění kontejnerů není tolik výhodný z pohledu využití prostoru na soupravě. Konstrukce prostředního vozů neunes více jak jeden plný kontejner a je tu navíc omezení zatížení na nápravu, které se musí splnit.

Od tohoto zapojení se dají očekávat horší jízdní vlastnosti, protože přibyla hmotnost prostředního vozu a přibýly odpory vlečného vozu.



obr. 28 Schéma zapojení 2

4.3.1 HMOTNOSTNÍ BILANCE SOUPRAVY T3+N3+T3

Návrh hmotnosti vozů:

- Hmotnost koncových vozů byla navržena na str. 23.

$$m_{\text{vůz}} = \underline{28\,085\text{ kg}}$$

- Návrh hmotnosti prostředního vlečného vozu:

$$m_{\text{vl}} = m_{\text{kostra spodku}} + 2m_{\text{podvozek}} + m_{\text{kontejner}} + m_{\text{platformy}} \quad (32)$$

$$= 2\,699 + 2 * 3\,750 + 15\,000 + 1\,500 = \underline{26\,669\text{ kg}}$$

4.3.2 SESTAVENÍ TRAKČNÍ CHARAKTERISTIKY SOUPRAVY T3+N3+T3

Rozjezd

a) Adhezní část:

Mám stejný počet tažných podvozků a stejné tažné vozy, bude tedy stejný postup i výsledek jako u zapojení 1 viz str. 24.

$$F_{\text{ad}} = \underline{82\,366\text{ N}}$$

b) Výkonová část:

Jak jsem popsal na str. 24, průběh výkonové části jsem modeloval podle grafu, viz obr. 11. I v tomto případě zapojení mám dva tažné vozy, to znamená stejný přiváděný výkon.

Odečtené hodnoty pro 2. zapojení. Jednotlivé hodnoty $F_{Př}$ jsou opět vynásobené dvěma:

$F_{Př}$ [N]	V [km/h]
8600	70
12000	60
33200	40
73340	30

tab. 7 Upravené body z obr. 11

Mocninná funkce bude opět:

$$F_{Př} = 4 * 10^8 * v^{-2,535} \quad (33)$$

Jmenovitý výkon:

$$F_{Pj} = \frac{P_j}{v_o} = \frac{8 * 40}{v_o} = \frac{320}{v_o} \quad (34)$$

Kontrola maximálního výkonu:

$$F_{HP} = \min(F_{Př}; F_{Pj}) \quad (35)$$

c) Průběh jízdních odporů:

Zde mi přibyl odpor vlečného (tlačeného) vozu. Bude to odpor v ložiskách náprav $O_{lož}$, v celkovém odporu valení se zvětší hmotnost soupravy a v případě stoupání se také zvětší celková hmotnost soupravy. U hnacích vozů je vliv odporu nápravových ložisek hnacích náprav započítán do účinnosti přenosu hnací síly na hnací kola vozidla a je nutné započítat pouze odpor ložisek běžných, tj. nehnacích náprav. Odpor ložisek by měl být velmi malý, ale pro úplnost ho zohledním.

Vtah pro odpor ložisek vychází ze znalosti měrného odporu daného výrobcem. Na prostředním voze máme čtyři nápravy tedy čtyři nápravová zatížení.:

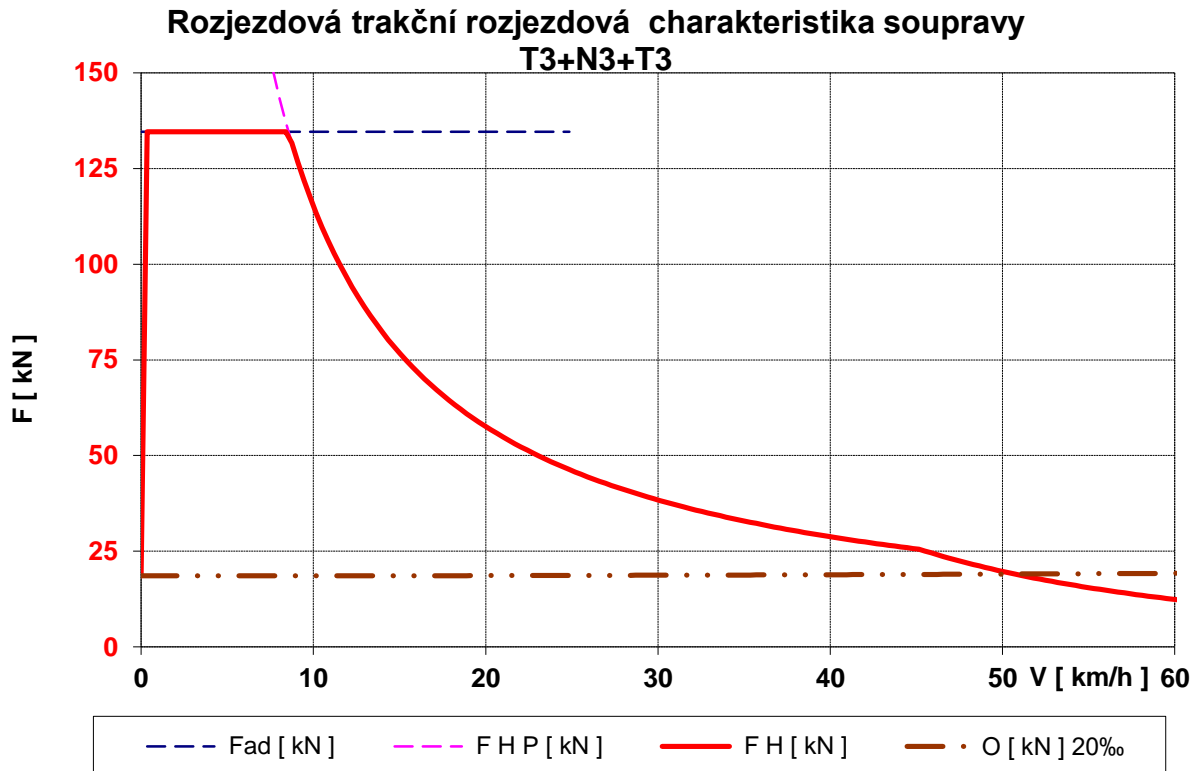
$$O_{lož} = p_{lož} * 2 * \frac{A}{2} * 4, p_{lož} = 0,1 \div 0,2 N \cdot kN^{-1} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} O(v) &= (O_f + O_{vzd}) + (O_a) + (O_a) + (O_{lož}) \\ &= m_s g p_f + \frac{1}{2} \rho_v C_x A v^2 + s m_s g + p_{lož} * 2 * \frac{A}{2} * 4 \end{aligned} \quad (37)$$

kde:

$p_{lož}$... měrný odpor kuželíkového ložiska daný výrobcem,
 A ... zatížení na nápravu

Nyní lze vytvořit trakční charakteristiku soupravy T3+N3+T3 při stoupání v rovinatých městech (20 ‰) při jmenovitém výkonu motorů.



obr. 29 Trakční rozjezdová charakteristika T3+N3+T3

Průběh hnací síly F_{HP} se oproti zapojení 1, viz. obr. 17, nezměnil. Výkonnostní část zůstala beze změny. Zvedla se nám křivka odporu O díky vlečnému vozu. Maximální dosažitelná rychlost soupravy je teď někde okolo 51 km/h, což je přijatelné.

Brzdění

Brzdění soupravy T3+N3+T3 by neměl být žádný problém především proto, že brzdit budou všechny nápravy.

a) Adhezní část:

Oproti zapojení T3+T3 mi v soupravě T3+N3+T3 přibyla hmotnost prostředního vozu. Návrh brzdící adhezní síly bude stejný jako v zapojení 1, viz str. 27.

$$F_B = 2 * m_{PV} * g * \mu_{DVb} * \eta_{DVb} \quad (38)$$

b) Řízená část:

Před adhezní částí máme ještě brzdou výkonovou část. Jako v zapojení 1 jsem odečetl hodnoty z grafu na obr. 11. Odečtené hodnoty jsou již vynásobené třemi, protože mám v soupravě tři vozy

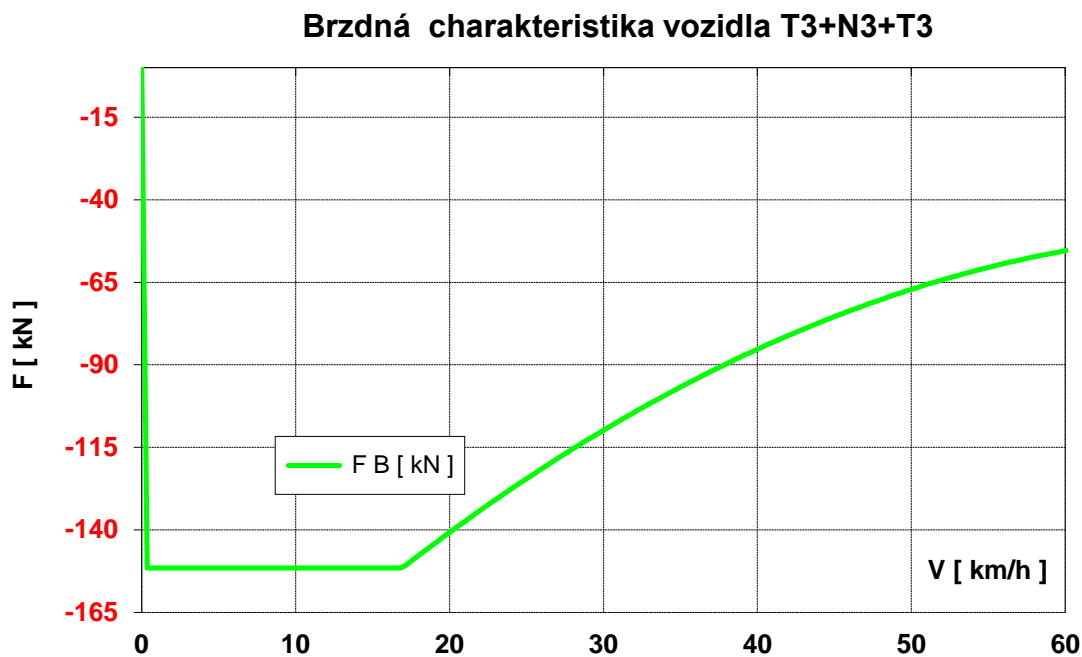
síla F_{BP} [kN]	rychlost V [km/h]
75	70
84	60
99,6	50
116,4	44

tab. 8 Upravené body z obr. 11

Polynom:

$$F_{BP} = 48,184V^2 - 7054,8V + 332994 \quad (39)$$

Nyní lze sestavit brzdou charakteristiku:



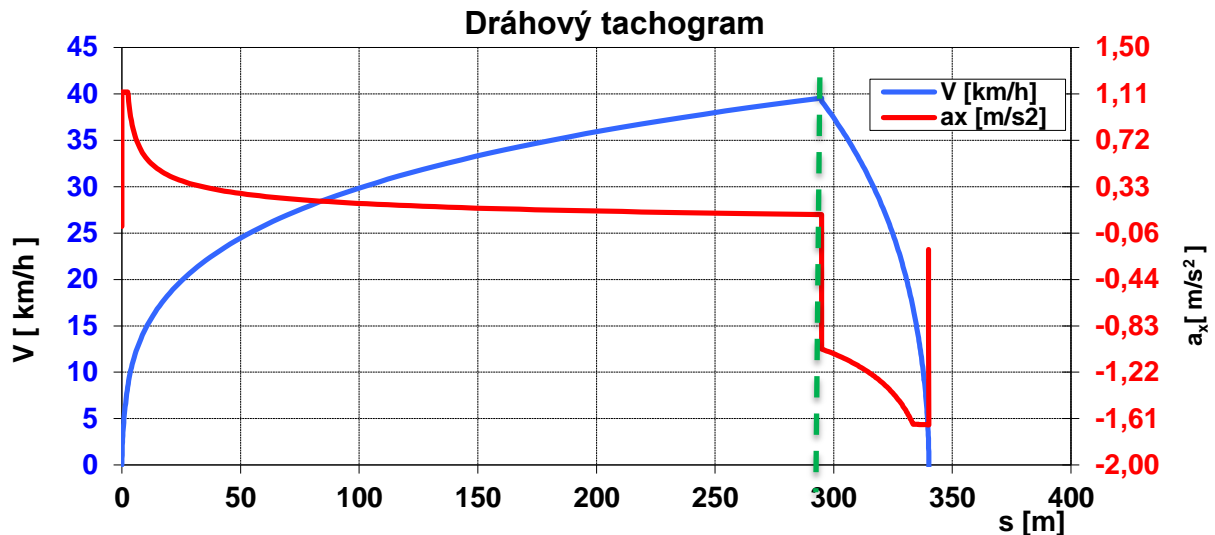
obr. 30 Brzdná ch. T3+N3+T3 (rovina) přiložený Excel

Z grafu na obr. 30 je vidět, že při rychlosti 17 km/h přechází výkonová část na adhezní část brzdění. S těmito znalostmi trakční charakteristiky mohou přistoupit k analýze jízdního cyklu soupravy Cargo Tram T3+N3+T3.

4.3.3 ANALÝZA JÍZDNÍHO CYKLU SOUPRAVY T3+N3+T3 NA 350 M JÍZDY PŘI JÍZDĚ NA PŘÍMÉ TRATI V ROVINATÝCH MĚSTECH (20 ‰)

Výpočty a vztahy jsou stejné, jako v předchozím zapojení 1 viz str. 28. Budu tedy uvádět pouze výsledky:

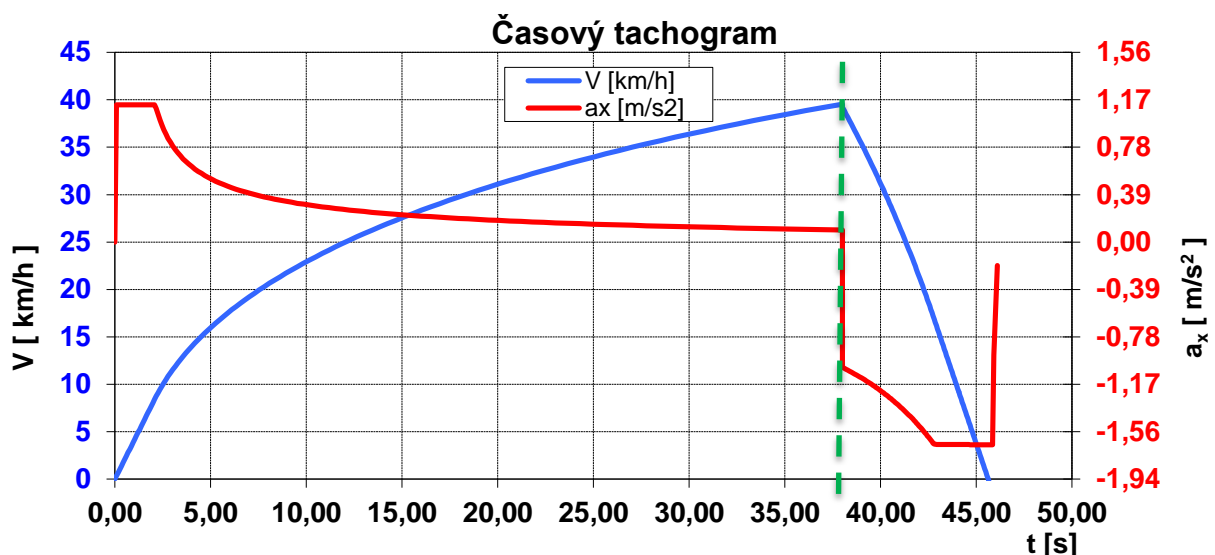
Určení chování rychlosti v zrychlení a během jízdy na dráze s :



obr. 31 Dráhový tachogram T3+N3+T3 (rovinatá města), z příloženého Excelu

V grafu na obr. 31 je zelenou čárkovanou čarou vyznačeno místo, kde souprava musí začít brzdit. Je to na vzdálenosti $s=293\text{m}$ při rychlosti 40 km/h . Zrychlení by se v tomto místě mělo skokově změnit do záporných hodnot, což odpovídá.

Chování rychlosti v a zrychlení a v čase t

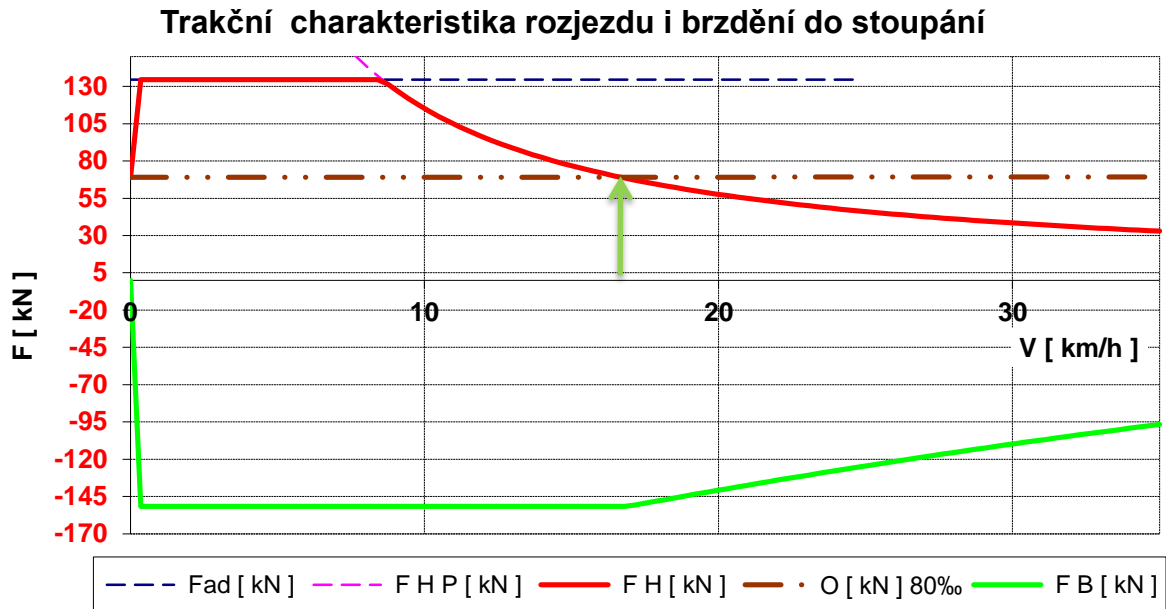


obr. 32 Časový tachogram T3+N3+T3 (rovina) z příloženého Excelu

V grafu je čárkovanou zelenou čarou vyznačeno, místo kde začíná souprava brzdit. Je to někde v čase cca 37s po rozjezdu. Dále je vidět chování rychlosti a času. Celou dráhu ujede za 45s.

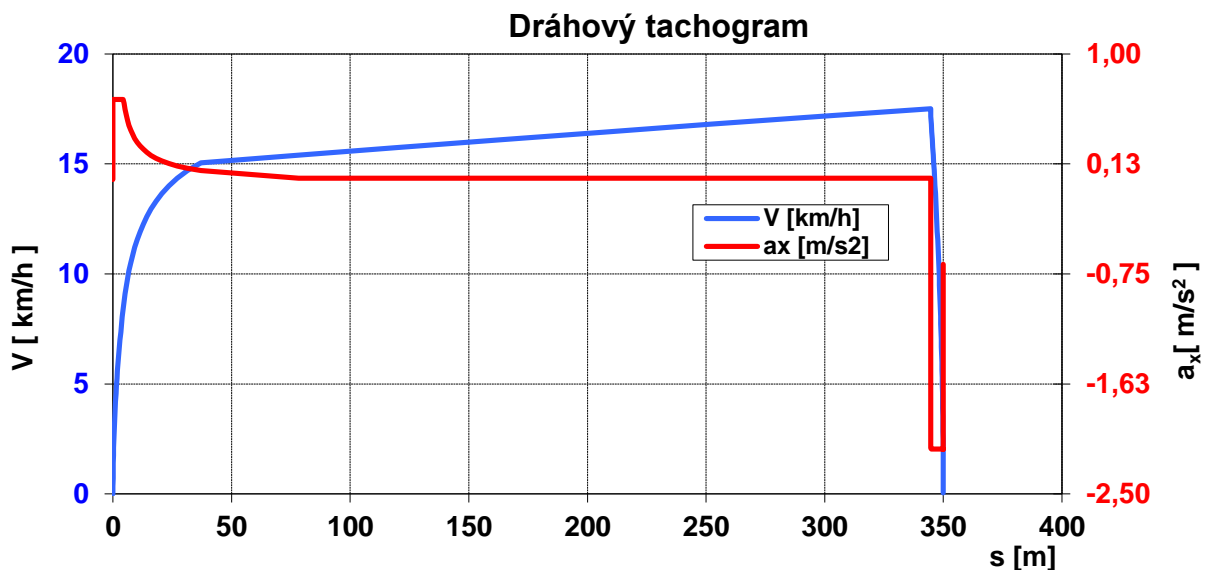
4.3.4 ANALÝZA JÍZDNÍHO CYKLU SOUPRAVY T3+N3+T3 NA 350 M JÍZDY PŘI JÍZDĚ DO STOUPÁNÍ

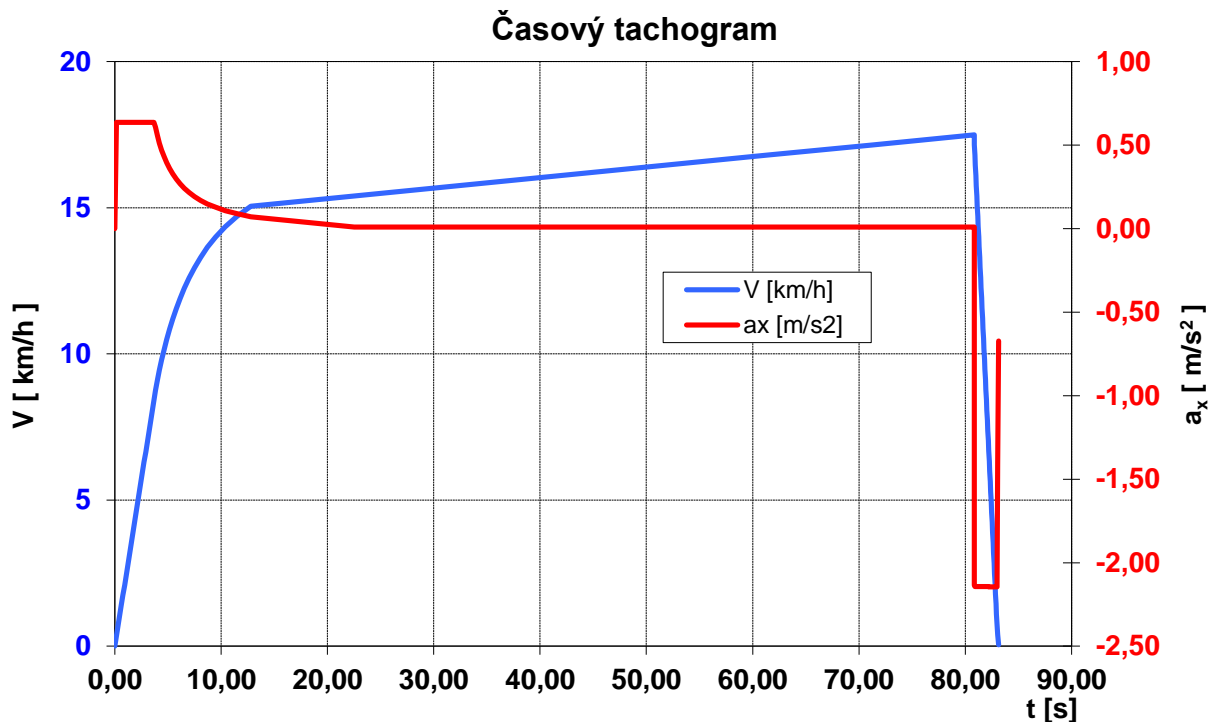
Toto bude opět stejný postup, jako u varianty zapojení 1 viz str. 31. Zde proto jsou vypsány pouze výsledky výpočtu. Výpočet je při stoupání 80‰.



V trakční charakteristice na obr. 33 se mi značně mění křivka celkového odporu. Při jízdě do stoupání 80‰ maximální rychlost klesla na 16 km/h. Zelená šipka ukazuje místo maximální dosažitelné rychlosti.

V dráhovém (obr. 34) a časovém (obr. 35) tachogramu je vidět, že se na dráze 350 m dokáže souprava dostat na 16 km/h a zvládne se rozjet a zastavit za 81 s.





obr. 35 Časový tachogram T3+N3+T3 při stoupání

Z pohledu mechaniky jízdy by tato souprava T3+N3+T3 moc nevyhovovala. Už při jízdě po rovinatém městě souprava stěží dosáhne 51 km/h při jmenovitém výkonu motorů. Také to znamená, že nebude moc dobře akcelarovat. Hodnoty zrychlení lze vidět na obr. 34 a obr. 35. Při stoupání do 80‰ dosáhne souprava maximálně 17 km/h což znamená, že budeme muset motory krátkodobě přetížit nad jmenovitý výkon.

4.3.5 NÁVRH DOČASNÉHO PŘETÍŽENÍ MOTORŮ PRO PŘEKONÁNÍ STOUPÁNÍ SOUPRAVY T3+N3+T3

Pro překonání stoupání 80 ‰ bude potřeba zatížit motory nad jejich běžný provozní jmenovitý výkon.

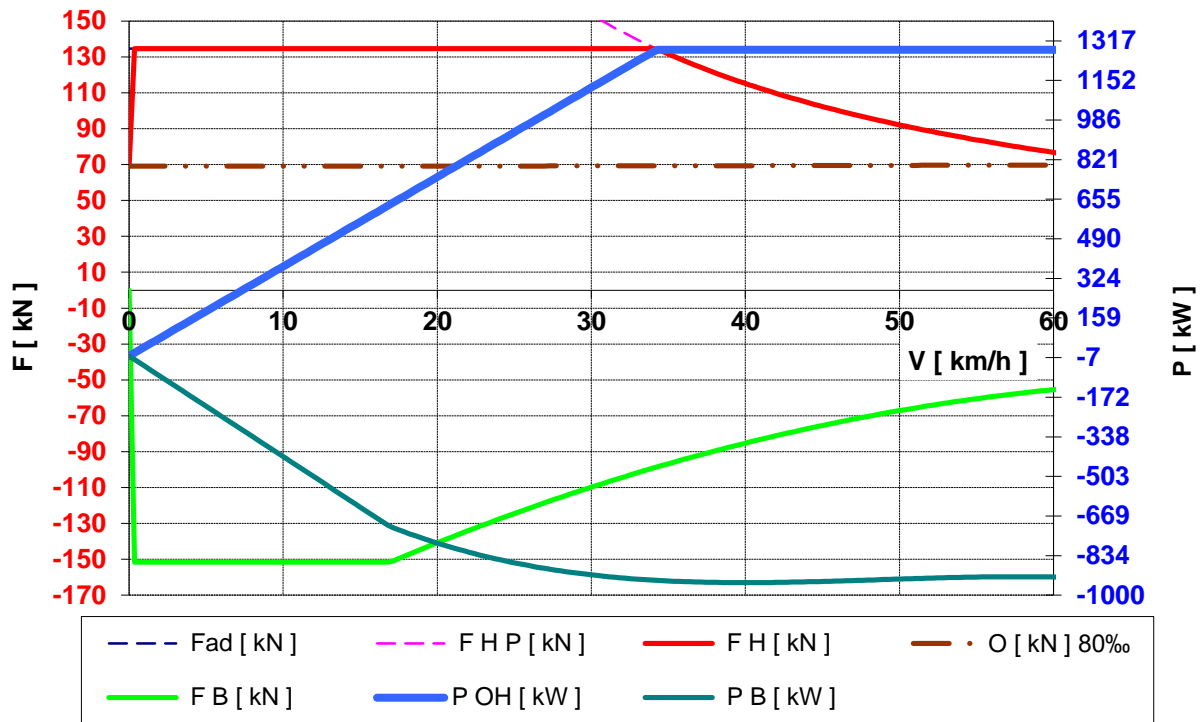
Hodnota jmenovitého výkonu T3+N3+T3: $P_j = 8 * 40 = 320 \text{ kW}$

Návrh navýšeného výkonu: $P_p = 4 * P_j = 1280 \text{ kW}$

Návrh přetížení jsem navrhl tak aby souprava mohla stoupat 50 km/h s rezervou pro další zrychlení, jinak by se rozjížděla příliš dlouho na danou rychlost 50 km/h.

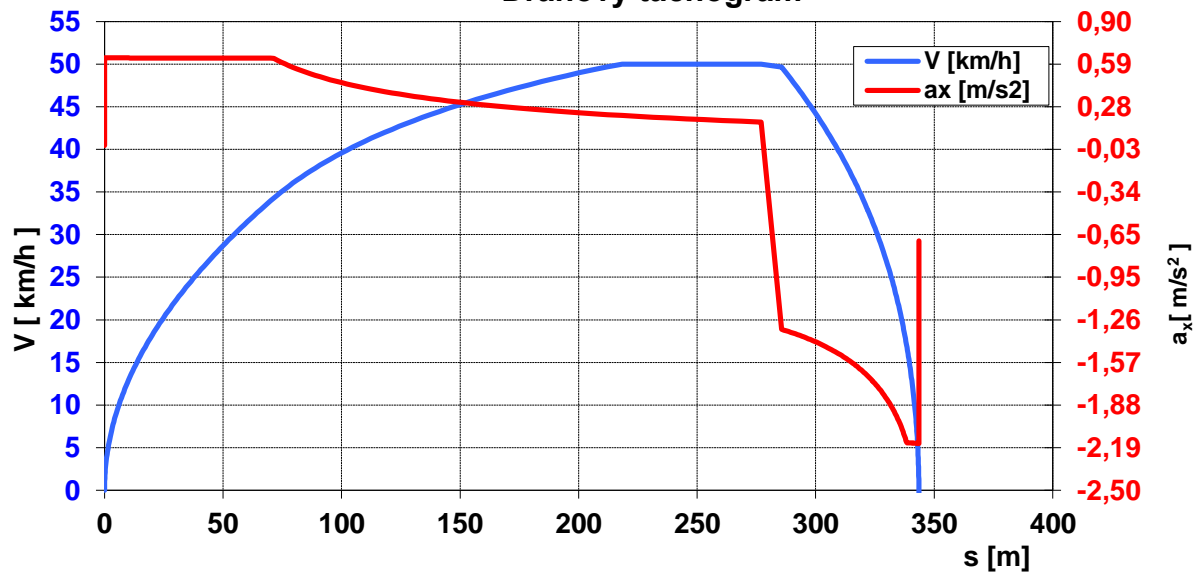
Výsledky:

Trakční charakteristika vozidla T3+N3+T3

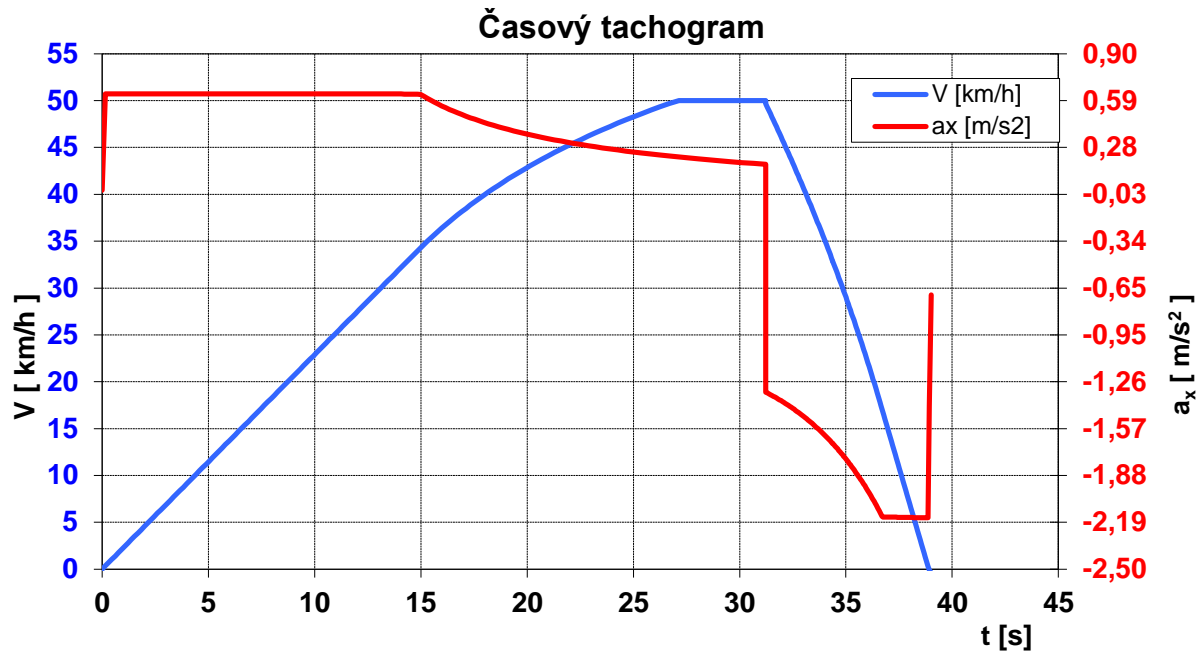


obr. 36 Trakční ch., přetížené motory T3+N3+T3

Dráhový tachogram



obr. 37 Dráhový tachogram T3+N3+T3 (stoupání, při přetížení)



obr. 38 Časový tachogram T3+N3+T3 (stoupání, při přetížení)

Při takto navrženém výkonu je vidět na obr. 36 že souprava dokáže jet až 60 km/h. T3+N3+T3 zvládne na přímé dráze dlouhé 350 m dosáhnout 50 km/h a zastavit. Na 350 m se rozjede a zastaví za cca 38 s.

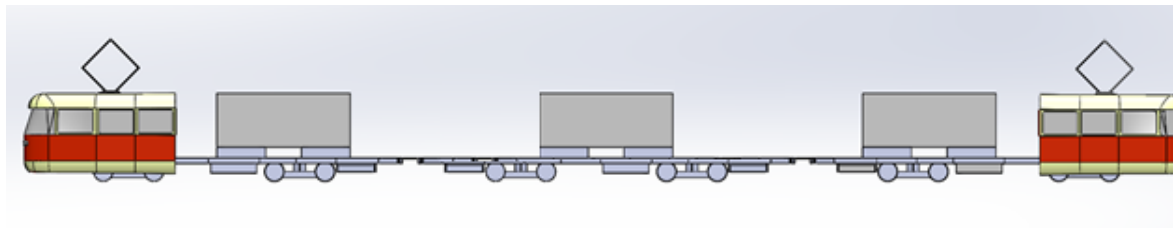
Závěr varianty 2:

Souprava při jízdě po rovinatých městech ještě splňuje požadavky na zrychlení při jmenovitém výkonu. Do stoupání 80 ‰ budu muset krátkodobě přetěžovat motory o 400% nad jmenovitý výkon. To přetížení ovšem rozhodně nepřipadá v úvahu, a proto budeme ještě analyzovat stejnou soupravu, ovšem se všemi hnanými nápravami T3+T3+T3.

4.4 VARIANTA ZAPOJENÍ 3 – SOUPRAVA T3+T3+T3

Tří vozová souprava. Všechny vozy tu jsou tažné. Plně naložena třemi plnými kontejnery. Řízení tažné síly soupravy je podle nejméně zatíženého podvozku. U zapojení 3 je potřeba ověřit, zda zatížení náprav prostředního vozu není menší než u koncových podvozků dle kterých analýzu provádíme.

Od tohoto zapojení se očekávají ještě lepší trakční vlastnosti než u zapojení 1 a 2, protože má o dva podvozky více. Souprava bude mít samozřejmě větší hmotnost, ale nepřilíš významně.



obr. 39 Schéma zapojení 3

4.4.1 HMOTNOSTNÍ BILANCE SOUPRAVY T3+T3+T3

Návrh hmotnosti vozů:

- Hmotnost koncových vozů byla navržena na str. 23.

$$m_{v\u00fatz} = \underline{29\,585\text{ kg}}$$

- Návrh hmotnosti prostředního vlečného vozu byl spočten na str. 37:

$$m_{vl} = \underline{26\,669\text{ kg}}$$

Zatížení od náprav prostředního vozu:

$$2A_{min} = \frac{m_{vl}}{2} g = \frac{26\,669}{2} 9,81 = 130\,811\text{ N} < 134\,623\text{ N}$$

V tomto zapojení T3+T3+T3 jsem vypočítal, že kola prostředního tažného vozu budou náchylnější k prokluzu než kola na koncových podvozcích, viz kapitola 4.1.2. Uvažoval jsem tedy:

$$2A_{min} = 130\,811\text{ N}$$

4.4.2 SESTAVENÍ TRAKČNÍ CHARAKTERISTIKY SOUPRAVY T3+T3+T3

Rozjezd

a) Adhezní část:

Stejný postup jako u zapojení 1 viz str. 24. Bral jsem v úvahu F_{ad} šestkrát protože máme šest hnaných podvozků.:

$$F_{ad} = 6\mu_k Q \quad (40)$$

b) Výkonová část:

Jak jsem popsal na str. 24, průběh výkonové části jsem modeloval podle grafu, viz obr. 11. I v tomto případě zapojení máme tři tažné vozy, to znamená větší přiváděný výkon.

Odečtené hodnoty pro 3. zapojení. Jednotlivé hodnoty F_{HP} jsou pře násobené třemi, protože máme tři stejně hnané vozy:

Síla F_{HP} [N]	rychlost v [km/h]
12900	70
18000	60
49800	40
110010	30

tab. 9 Upravené body z obr. 11

V tomto zapojení se nám výkonová mocninná funkce posune doprava:

$$F_{HP} = 6 * 10^8 * v^{-2,535} \quad (41)$$

Jmenovitý výkon:

$$F_{Pj} = \frac{P_j}{v_o} = \frac{8 * 40}{v_o} = \frac{320}{v_o} \quad (42)$$

Kontrola maximálního výkonu:

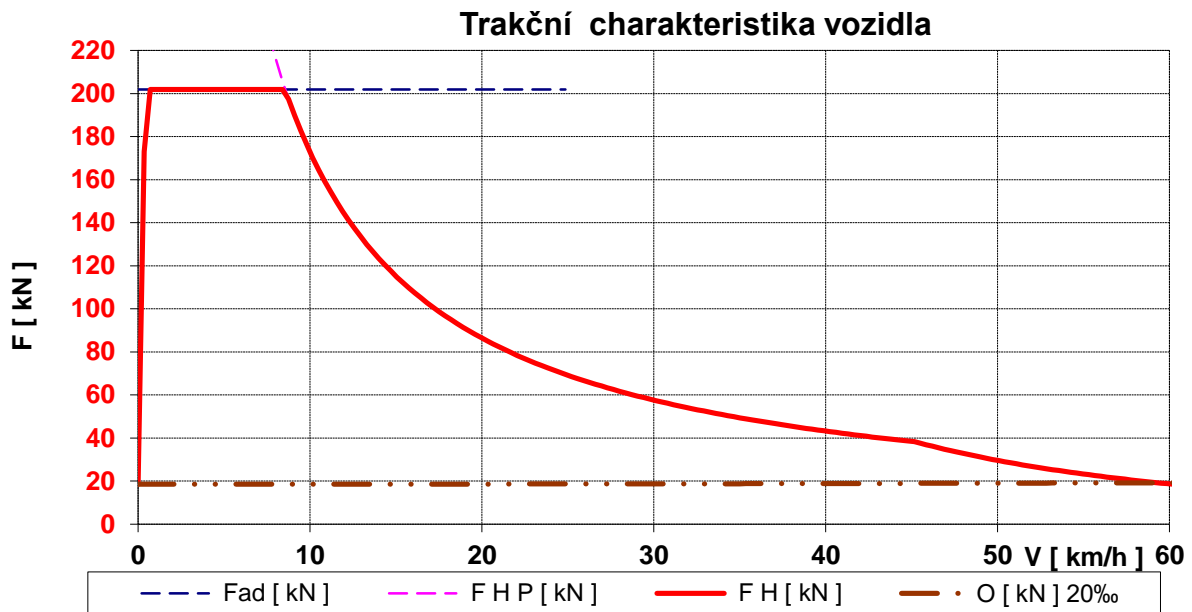
$$F_{HP} = \min(F_{Pj}; F_{Pj}) \quad (43)$$

c) Průběh jízdnic odporů:

Zde jsem použil stejný vztah, který byl navržen u zapojení 1, viz rovnice (17):

$$O = (O_f + O_{vzd}) + (O_a) + (O_a) = m_s g p_f + \frac{1}{2} \rho_v C_x A v^2 + s m_s g \quad (44)$$

Nyní lze vytvořit rozjezdovou trakční charakteristiku soupravy T3+T3+T3 při stoupání 20‰, které se uvažují pro rovinatá města.



obr. 40 Trakční rozjezdová charakteristika T3+T3+T3 (rovinatá města)

Souprava při jmenovitém výkonu dokáže dosáhnout rychlost 60 km/h viz obr. 40. Rozjezdová síla je okolo 201 kN.

Brzdění

Brzdění soupravy T3+N3+T3 by neměl být žádný problém především proto, že brzdit budou všechny nápravy.

a) Adhezní část:

Oproti zapojení T3+T3 mi v soupravě T3+T3+T3 přibude hmotnost prostředního vozu. Návrh brzdné adhezní síly bude stejný jako v zapojení 1 viz str.27, až na hodnotu $2A_{min}$.

b) Řízená část:

Před adhezní částí je ještě brzdná výkonová část. Jako v zapojení 1 jsem odečetl hodnoty z grafu na obr. 11. Odečtené hodnoty jsou již vynásobené třemi, protože máme v soupravě tři vozy:

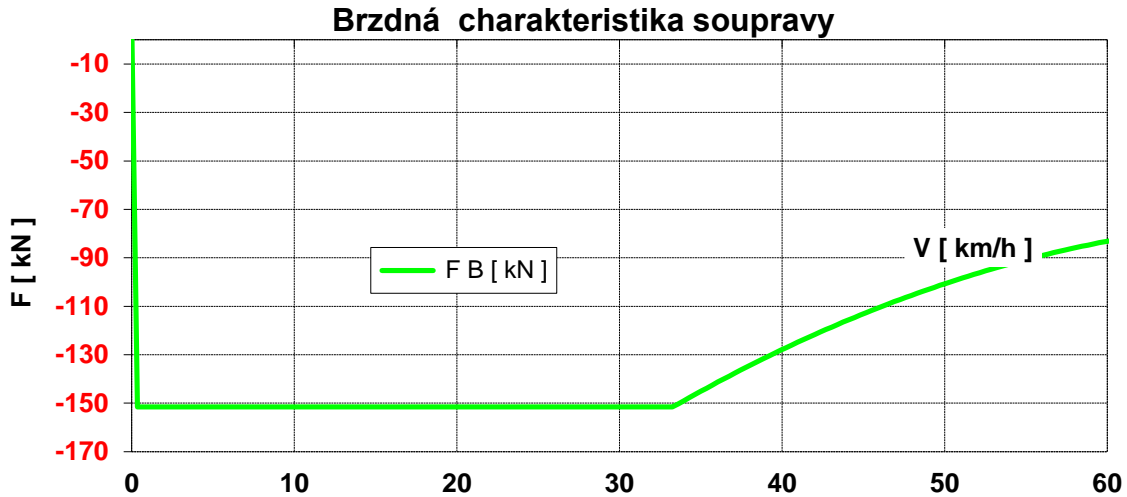
Síla F_{BP} [kN]	rychlost V [km/h]
50	70
56	60
66,4	50
77,6	44

tab. 10 Upravené body z obr. 11

Polynom vytvořený z odečtených hodnot:

$$F_{BP} = 32,123V^2 - 4703,2V + 221996$$

Nyní lze sestavit brzdňou charakteristiku:



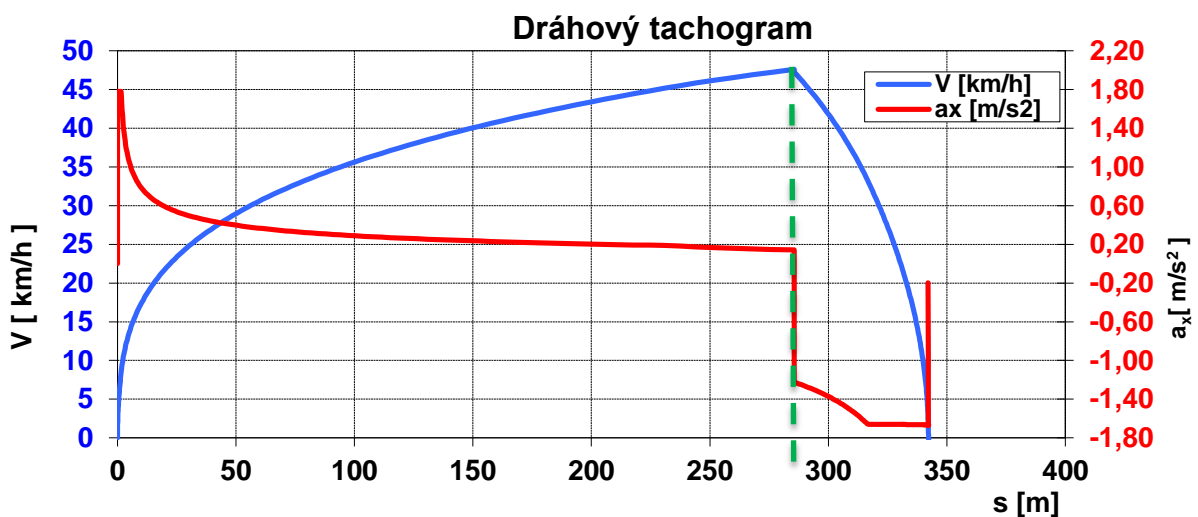
obr. 41 Brzdňá ch. T3+T3+T3 (rovina) přiložený Excel

Z grafu na obr. 41 je vidět, že při rychlosti 35 km/h přechází výkonová část na adhezní část brzdění. S těmito znalostmi trakční charakteristiky mohou přistoupit k analýze jízdního cyklu soupravy Cargo Tram T3+T3+T3.

4.4.3 ANALÝZA JÍZDNÍHO CYKLU SOUPRAVY T3+T3+T3 NA 350 M JÍZDY PŘI JÍZDĚ NA PŘÍMÉ TRATI V ROVINATÝCH MĚSTECH (20 ‰)

Výpočty a vztahy jsou stejné, jako v zapojení 1 viz str. 28. Budu tedy uvádět pouze výsledky:

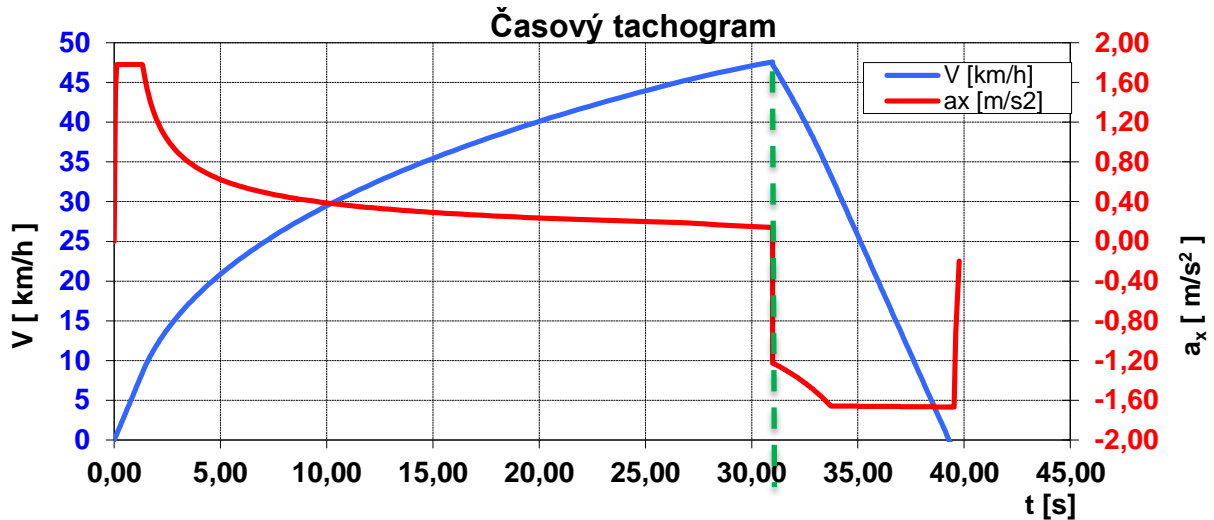
Určení chování rychlosti v zrychlení a během jízdy na dráze s :



obr. 42 Dráhový tachogram T3+T3+T3 (rovinaté město), z přiloženého Excelu

V grafu je zelenou čárkovanou čarou vyznačeno místo, kde souprava dosáhla maximální rychlosti 48 km/h. Je to na vzdálenosti $s=287\text{m}$. Červeně je zobrazené zrychlení soupravy.

Chování rychlosti v a zrychlení a v čase t

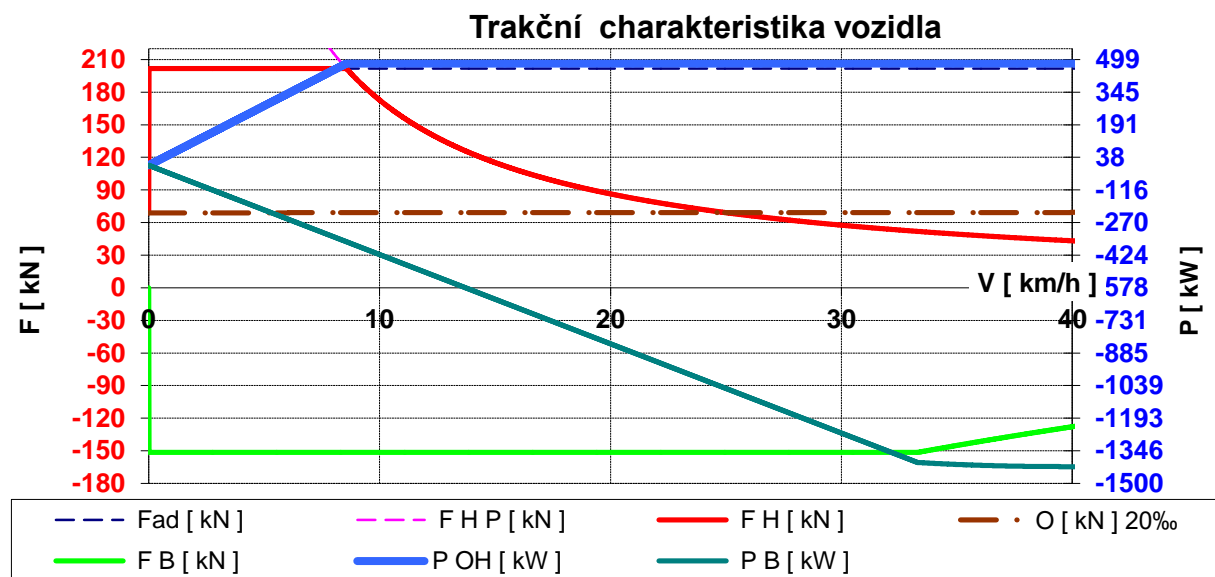


obr. 43 Časový tachogram T3+T3+T3 (rovina) z příloženého Excelu

V grafu je čárkovanou zelenou čarou vyznačeno, místo kde souprava dosáhne maximální rychlosti. Je to někde kolem 31s po rozjezdu. Dále je vidět chování rychlosti a času. Celou dráhu ujede za 38s.

4.4.4 ANALÝZA JÍZDNÍHO CYKLU SOUPRAVY T3+T3+T3 NA 350 M JÍZDY PŘI JÍZDĚ DO STOUPÁNÍ

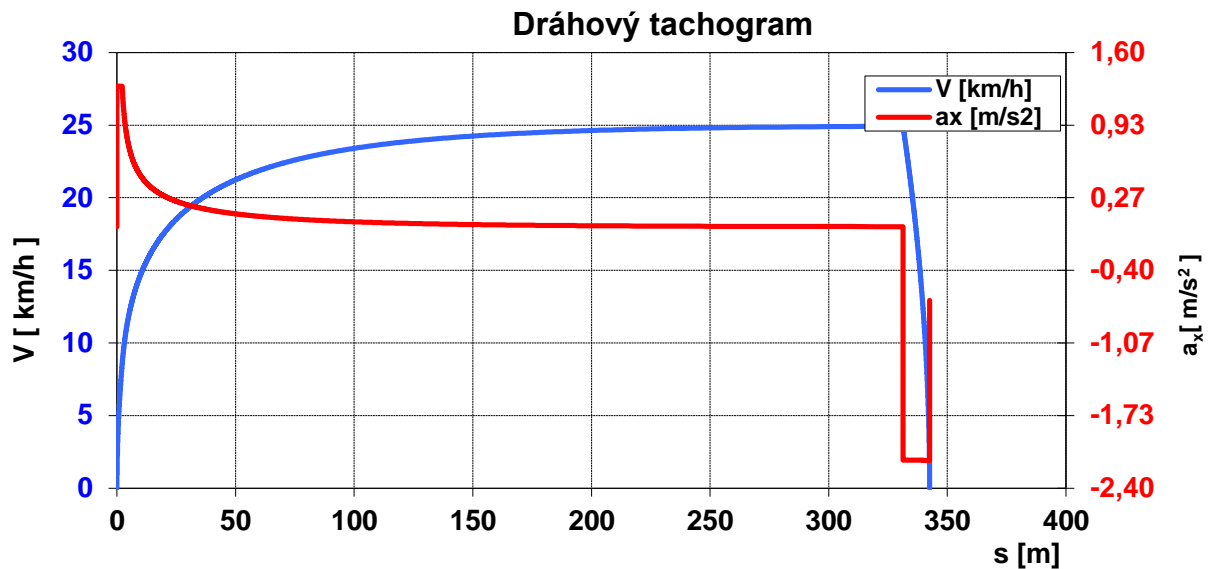
Toto bude opět stejný postup, jako u varianty zapojení 1 viz str. 31. Zde proto jsou vypsány pouze výsledky výpočtu. Výpočet je při stoupání 80 ‰.



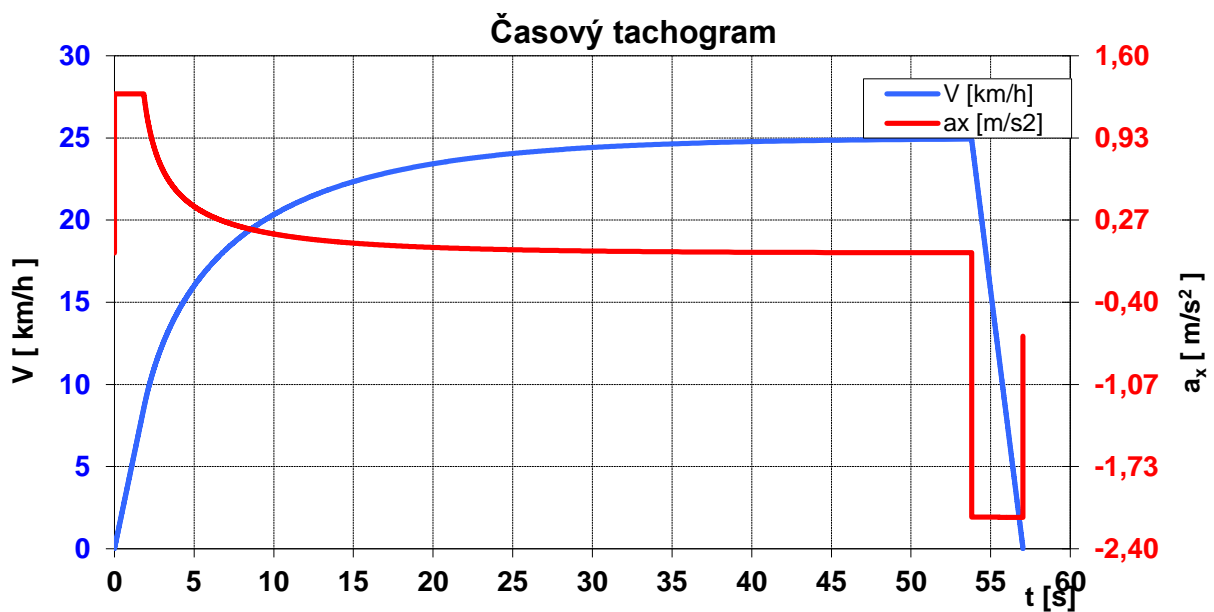
obr. 44 Rozjezdová a brzdňá trakční ch.T3+T3+T3 (stoupání) příložený Excel

V trakční charakteristice Při jízdě do stoupání 80 ‰ maximální rychlost je někde okolo 25 km/h.

V dráhovém a časovém tachogramu je vidět, že se na dráze 350 m nedokáže souprava dostat na maximální povolenou rychlost 50 km/h, zvládne se rozjet a zastavit za 52 s.



obr. 45 Dráhový tachogram T3+T3+T3 při stoupání

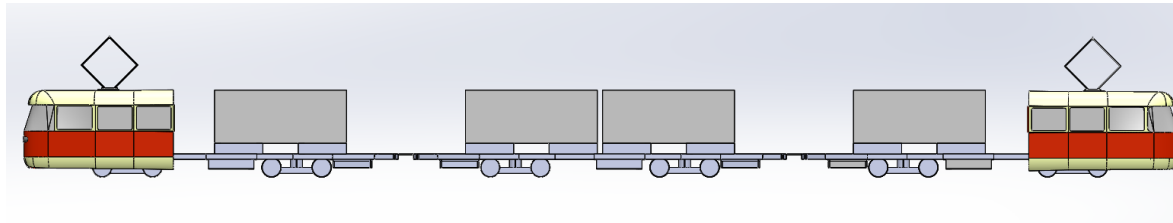


obr. 46 Časový tachogram T3+T3+T3 při stoupání

Z pohledu mechaniky jízdy by tato souprava T3+T3+T3 nevyhovovala. Tedy ani při tomto zapojení při požadavku dosažení jízdy rychlostí až 50 km/h se nevyhneme přetížení motorů na 250% jmenovitého výkonu. V tomto případě je však značně nevyužitá ložná plocha tramvajové soupravy. Proto jsem se zabýval i otázkou použít na vloženém voze dva kontejnery.

4.5 VARIANTA ZAPOJENÍ 4

Tato varianta je nepřípustná, protože by kostra spodku čtyřnápravového tramvajového vozu a podvozku tramvají takovou zátěž od nákladu neunesla. Vložený vůz by musel z důvodu únostnosti tramvajových kol použít tři dvounápravové podvozky.



obr. 47 Schéma zapojení 1

Z předchozích výpočtů lze ovšem předpokládat že takto zatížená souprava by při pohonu všech náprav nejspíš neměla problémy se flexibilně pohybovat. Ovšem pokud by prostřední vůz byl vlečný, tak už by souprava nejspíš nebyla provozu schopná.

5 ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ A KOMENTÁŘ

Pro přehlednější porovnání výsledků je zde uvedeno několik důležitých výstupních hodnot v kritériální tabulce:

Pmax=Pjm		T3+T3	
název	Do stoupání 20 ‰	Do stoupání 80 ‰	80 ‰, Pmax=2,5*320=800 W (250%)
Maximální dosažitelná rychlost na dráze 350 m se zastavením [km/h]	48	24	50
Doba na ujetí 350 m se zastavením [s]	40	57	36
Maximální dosažitelná rychlost na dráze větší jak 350 m [km/h]	58	24	60
Brzdná dráha z 50 km/h při klesání 80 ‰ [m]	159		
Použitelnost	spíše ne	ne	ANO
Pmax=Pjm		T3+N3+T3	
název	Do stoupání 20 ‰	Do stoupání 80 ‰	80 ‰, Pmax=4*320=1280 W (400%)
Maximální dosažitelná rychlost na dráze 350 m se zastavením [km/h]	40	16	50
Doba na ujetí 350 m se zastavením [s]	45	81	40
Maximální dosažitelná rychlost na dráze větší jak 350 m [km/h]	51	16	>60
Použitelnost	spíše ne	ne	NE
Pmax=Pjm		T3+T3+T3	
název	Do stoupání 20 ‰	Do stoupání 80 ‰	
Maximální dosažitelná rychlost na dráze 350 m se zastavením [km/h]	48	25	
Doba na ujetí 350 m se zastavením [s]	38	52	
Maximální dosažitelná rychlost na dráze větší jak 350 m [km/h]	60	25	
Použitelnost	spíše ne	ne	

tab. 11 Výsledková tabulka

Z výpočtů je vidět, že budeme muset soupravy T3+T3 při jízdě do stoupání 80‰ dočasně přetěžovat. Přetížení motorů u zapojení T3+T3 je ještě přijatelné.

Při po zapojení vlečného vozu, tj. při vytvoření soupravy T3+N3+T3 bychom při stoupání 80‰ musely přetížit motory o 400% jmenovitého výkonu, což už není provozu schopné.

Z toho plyne, že by tří vozová souprava T3+N3+T3 není vhodná a musela by být použita souprava typu T3+T3+T3, tj. souprava musí mít hnané všechny nápravy. To by byl ovšem u prostředního vozu problém, protože ten měl mít v úvodním návrhu soupravy odstraněný chladicí systém pro trakční motory. Provedené výpočty, však prokázaly, že i u vloženého vozu je nutné zachovat cizí ventilaci trakčních motorů.

Jedině tak je lze přetěžovat takzvaným hodinovým výkonem. Tímto způsobem jsou dočasně přetížený i motory klasické T3.

Provedl jsem základní trakční analýzu nákladní tramvaje na přímé trati po rovinatých městech (20 ‰) a do stoupání 80 ‰.

Tento způsob ověřování trakčních vlastností soupravy se běžně používá pro návrh pohonu jakéhokoliv vozidla.

6 BIBLIOGRAFIE

- [1] T. Dusil, „auto.cz,“ CZECH NEWS CENTER a.s., 26. 4. 2018. [Online]. Available: <http://www.auto.cz/technologie-ktera-zajisti-dieselu-budoucnost-bosch-slibuje-drasticke-snizeni-nox-121307>. [Přístup získán 27. 5. 2018].
- [2] „Wikipedie,“ 6 12 2016. [Online]. Available: https://cs.wikipedia.org/wiki/Nákladní_tramvaj. [Přístup získán 7 3 2018].
- [3] „Wikipedie,“ 10 12 2017. [Online]. Available: [https://de.wikipedia.org/wiki/CarGoTram_\(Dresden\)](https://de.wikipedia.org/wiki/CarGoTram_(Dresden)). [Přístup získán 7 3 2018].
- [4] M. Pavelec, „lidovky.cz,“ [Online]. Available: https://byznys.lidovky.cz/praha-chysta-uderku-mazacich-tramvaji-proti-skriptu-zbroji-i-moderni-vozy-17i-doprava.aspx?c=A161116_145132_In-doprava_pave. [Přístup získán 21 4 2018].
- [5] Eltis editor, „Eltis,“ 22 5 2015. [Online]. Available: <http://www.eltis.org/discover/case-studies/cargo-tram-and-e-tram-bulky-and-electric-waste-collection-tram-zurich>. [Přístup získán 22 4 2018].
- [6] F. Jansa, Trakční mechanika a energetika kolejové dopravy, Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1958.
- [7] P. F. a. I. M. Stanislav LINERT, Kolejová vozidla pražské hromadné dopravy, Praha: Dopravní podnik hl. m. Prahy, 2005.
- [8] F. Vlček, Převodová ústrojí motorových vozidel, Brno: Nakladatelství a vydavatelství VLK, 2000.
- [9] doc. Ing. Josef Kolář, CSc., *Úvod do dopravní techniky*, Praha, 2014.
- [10] J. Benák, „foto Spalovna v pražských Malešicích,“ 22 12 2014. [Online]. Available: https://praha.idnes.cz/zakazka-na-svoz-komunalniho-odpadu-v-praze-f2n-/praha-zpravy.aspx?c=A141220_2126037_praha-zpravy_mis1. [Přístup získán 4 6 2018].

7 SEZNAMY

Seznam obrázků:

obr. 1 Spalovna Malešice [10]	10
obr. 2 Schématický popis svozu SKO po Praze (pro ilustraci).....	11
obr. 3 Tramvaj CarGoTram [2].....	12
obr. 4 Pětidílný vlak nákladní tramvaje CarGoTram [3]	13
obr. 5 Mazací vůz T4 [4].....	13
obr. 6 Tatra T4 přestavěná na nákladní tramvaj ve Lvově	14
obr. 7 Nákladní tramvaj v Zurichu [5].....	14
obr. 8 Ideální trakční hyperbola při $P=360$ kW.....	15
obr. 9 Schéma kola tramvaje	16
obr. 10 Skutečná trakční charakteristika [6]	17
obr. 11 Známa trakční charakteristika vozu T3R	18
obr. 12 Boční pohled a řez kabinou [7]	19
obr. 13 Upravená tramvaj T3 na tažný koncový vůz, naloženo kontejnerem.....	20
obr. 14 zavedení nosníku a poloha kontejneru na modelu upravené T3	21
obr. 15 Schéma s polohou sil.....	21
obr. 16 Schéma zapojení 1	23
obr. 17 Rozjezdová trakční ch.T3+T3 (rovina)	26
obr. 18 Brzdná ch. T3+T3 (rovina) přiložený Excel	28
obr. 19 Dráhový tachogram T3+T3 (rovina)	30
obr. 20 Časový tachogram T3+T3 (rovina)	31
obr. 21 Rozjezdová a brzdná trakční ch.T3+T3 (stoupání) přiložený Excel	32
obr. 22 Dráhový tachogram T3+T3 při stoupání	32
obr. 23 Časový tachogram T3+T3 při stoupání.....	33
obr. 24 Trakční ch., přetížené motory T3+T3	34
obr. 25 Dráhový tachogram T3+T3 (stoupání, při přetížení).....	34
obr. 26 Časový tachogram T3+T3 (stoupání, při přetížení)	35
obr. 27 Dráhový tachogram T3+T3 (klesání 80‰)	36
obr. 28 Schéma zapojení 2	37
obr. 29 Trakční rozjezdová charakteristika T3+N3+T3	39
obr. 30 Brzdná ch. T3+N3+T3 (rovina) přiložený Excel.....	40
obr. 31 Dráhový tachogram T3+N3+T3 (rovinatá města), z přiloženého Excelu	41
obr. 32 Časový tachogram T3+N3+T3 (rovina) z přiloženého Excelu.....	41
obr. 33 Rozjezdová a brzdná trakční ch.T3+N3+T3 (stoupání) přiložený Excel.....	42
obr. 34 Dráhový tachogram T3+N3+T3 při stoupání.....	42
obr. 35 Časový tachogram T3+N3+T3 při stoupání	43
obr. 36 Trakční ch., přetížené motory T3+N3+T3.....	44
obr. 37 Dráhový tachogram T3+N3+T3 (stoupání, při přetížení)	44

obr. 38 Časový tachogram T3+N3+T3 (stoupání, při přetížení)	45
obr. 39 Schéma zapojení 3	46
obr. 40 Trakční rozjezdová charakteristika T3+T3+T3 (rovinatá města)	48
obr. 41 Brzdná ch. T3+T3+T3 (rovina) přiložený Excel	49
obr. 42 Dráhový tachogram T3+T3+T3 (rovinaté město), z přiloženého Excelu	49
obr. 43 Časový tachogram T3+T3+T3 (rovina) z přiloženého Excelu	50
obr. 44 Rozjezdová a brzdná trakční ch.T3+T3+T3 (stoupání) přiložený Excel	50
obr. 45 Dráhový tachogram T3+T3+T3 při stoupání	51
obr. 46 Časový tachogram T3+T3+T3 při stoupání.....	51
obr. 47 Schéma zapojení 1	52

Seznam tabulek:

tab. 1 Specifikace CarGoTram Zurich	13
tab. 2 vyčíslené výkony z obr. 11	18
tab. 3 Technické údaje Tramvaj T3 SUCS	19
tab. 4 Vstupní hodnoty ke všem variantám zapojení	20
tab. 5 Upravené body z obr. 11	24
tab. 6 Upravené body z obr. 11	27
tab. 7 Upravené body z obr. 11	38
tab. 8 Upravené body z obr. 11	40
tab. 9 Upravené body z obr. 11	47
tab. 10 Upravené body z obr. 11	48
tab. 11 Výsledková tabulka	53

Seznam příloh:

[1] Typový výkres T3+T3 1xA3