

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Návrh výpočetního software pro trakční energetické výpočty
Tomáš Hering

Diplomová práce
2018

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji:

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 12.1.2018.

Tomáš Hering

Poděkování

Chtěl bych poděkovat své rodině a přátelům za velkou motivaci a podporu při tvorbě práce.

Rovněž bych chtěl ocenit pracovníky KEEZ za kvalitní a zábavnou výuku. Děkuji.

ANOTACE

Práce je zaměřena na analýzu drážních energetických výpočetních metod a tvorbu programu, který na základě parametrů tratě, drážních vozidel a jejich grafikonu simuluje okamžitou výkonovou spotřebu ve vymezeném úseku. Jedná se o samostatně spustitelný software se CSV zdrojem vstupních dat a možností generování souborů s výslednými hodnotami. Aplikace je psána v jazyce C#.

KLÍČOVÁ SLOVA

Trakční výpočty, železnice, simulační software, C#

TITLE

Traction calculations simulation software design

ANNOTATION

The thesis is focused on the analysis of today traction calculations methods and the development of a program, which simulates the energetic consumption in a specified span of a railway track based on its parameters, the schedule and the vehicles' characteristics. The program is a standalone application consuming CSV input data sources. The calculated results are saved into files of the same format. App's source code is written in C#.

KEYWORDS

Traction calculations, railway, simulation software, C#

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš Hering**
Osobní číslo: **D15450**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Elektrotechnické a elektronické systémy v dopravě**
Název tématu: **Návrh výpočetního software pro trakční energetické výpočty**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

Zásady pro vypracování:

1. Zhodnocení užívaných výpočetních metod
 - 1.1. Výpočetní metoda dle předpisu SŽDC (ČSD) V7
 - 1.2. Jiné používané metody
 - 1.3. Volba výpočetní metody pro tvorbu software
2. Modely chování jednotlivých částí systému
 - 2.1 Model napájecí soustavy
 - 2.2 Model traťových poměrů
 - 2.3 Model vlaku
3. Návrh software
 - 3.1. Volba vhodných programových prostředků
 - 3.2. Programování výpočetního jádra
 - 3.3. Grafická nadstavba
4. Vyhodnocení výstupů
 - 4.1. Srovnání výstupů software s výpočetní metodou dle SŽDC (ČSD) V7 na konkrétním příkladu
 - 4.2. Doporučení pro aplikaci software

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

ČSD V7 Trakční výpočty, Federální ministerstvo dopravy, Praha 1982

Napájení elektrických drah III, Jansa F., Peleňský Š, ALFA 1976

Dynamika a energetika elektrické trakce, Drábek J., ALFA 1987

Elektromagnetická kompatibilita (EMC) drážních zařízení, Hlava K., Pardubice 2004

Pevné elektrické trakčné zariadenia, Lanákova, Oslovič, Univerzita Žilina 2006

Fahrdynamik des Schienenverkehrs; Wende, D.; 1. Auflage, B.G. Teubner, Stuttgart Leipzig Wiesbaden, 2003

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Ladislav Mlynařík, Ph.D.

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

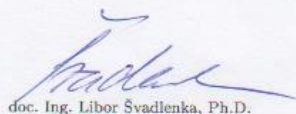
Konzultant diplomové práce:

Ing. Jindřich Kašpar

EŽ Praha a.s.

Datum zadání diplomové práce: **27. října 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2017**



doc. Ing. Libor Švadlenka, Ph.D.

děkan

L.S.



Ing. Dušan Čermák, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 8. března 2017

Obsah

Seznam zkratk	9
Úvod	10
1. Trakční mechanika.....	11
1.1. Pasivní odpory.....	11
1.2. Dynamické odpory	13
1.3. Trakční síla.....	14
1.4. Brzdná síla.....	20
2. Stávající výpočetní metody	22
2.1. ČSD V7	22
2.2. Metoda dle zadaného GVD.....	23
3. Použitá výpočetní metoda.....	26
3.1. Základní požadavky	26
3.2. Vozidla	27
3.3. Sestava tachogramu.....	27
3.4. Traťový úsek	31
4. Model soupravy	37
4.1. Tažná síla	37
4.2. Brzdná síla vozidel.....	38
4.3. Elektrické reprezentace	41
5. Elektrický model stacionárních zařízení dopravní cesty	46
6. Implementace.....	50
6.1. Architektura.....	50
6.2. Jízda vlaku.....	50
6.3. Řešení elektrického obvodu	52
6.4. Externí knihovny.....	55

7. Grafické rozhraní a obsluha programu	57
7.1. Vstupní data a načítání ze souborů.....	57
7.2. Tvorba souprav a jízdního řádu.....	60
7.3. Simulace a výstupní data.....	61
8. Závěr.....	63
Příloha A Obsah vloženého CD.....	64
Příloha B Licence knihovny Miscellaneous Utility Library	65
Seznam obrázků.....	67
Seznam tabulek.....	68
Seznam pramenů.....	69

Seznam zkratek

FKZ	Filtračně-kompenzační zařízení
TNS	Trakční napájecí stanice
TV	Trakční vedení
ATP	Automatic Train Protection
ATC	Automatic Train Control
SJŘ	Sešitový jízdní řád
GVD	Grafikon vlakové dopravy
HV	Hnací vozidlo

Úvod

Aktuální rozvoj železniční dopravy si žádá nejen nutné rekonstrukce infrastruktury, ale v mnoha případech také navýšení její propustnosti. Se zvyšováním četnosti vlaků nebo jejich rychlosti jsou kladeny větší nároky na dostupnost výkonu v trolejovém vedení. Trend je natolik signifikantní, že je zvažována záměna typu trakční soustavy. Vzhledem k finanční náročnosti rekonstrukcí tohoto druhu, je zřejmě výhodné disponovat nástrojem, který umožní komplexní simulaci zamýšleného stavu co do dopravního výkonu (grafikonu) a využití napájecí infrastruktury.

Dalším důležitým faktorem je rozmach vozidel umožňujících odběr s minimální jalovou složkou a spektrem s malým obsahem vyšších frekvencí na AC systémech a obecně také vozidel s možností rekuperace. Na druhý zmiňovaný faktor sice nelze spoléhat a lze v souvislosti s ním „pouze“ optimalizovat jízdní řád tak, aby rekuperace našla využití, nicméně snižování harmonických vlivů by do budoucna mohlo znamenat odbourání potřeby výstavby filtrační části FKZ.

Cílem práce není hodnocení jednotlivých typů souprav, či trakčních soustav, zároveň nejde o nástroj pro věrnou simulaci všech elektrických vlastností obvodu, nýbrž o návrh pomůcky, která bude univerzálně použitelná pro jakoukoliv železniční správu a konfiguraci dopravců při analýze dopadu změny způsobu napájení nebo dopravního výkonu.

1. Trakční mechanika

Trakční výpočty jsou jedním z pilířů analýzy realizace dopravy po železniční dopravní cestě. Přepřavované hmotnosti a charakter souprav si žádá rozvahu nad jízdou vlaku ještě před jejím započítáním. Otázky typu: „jak dlouho bude dopravní prostředek projíždět tento úsek? Dosáhne vůbec stanovené rychlosti s plánovanou zátěží? Kolik spotřebuje paliva?“ a další by bez relevantních výpočtů musely být testovány experimentálně. Proto se o ně musí opřít také tato práce.

Hnací vozidlo musí pro realizaci pohybu soupravy dle Newtonových zákonů na ni působit silou, která je alespoň rovna silám působícím protivně. Odporové síly lze velmi přehledně rozdělit takto:

- Aktivní – působí mezi prvotním zdrojem pohybové energie (motor) a místem realizace tažné síly (styk kolo-kolejnice). Jsou dány konstrukčním řešením vozidla a uvažují se jako konstantní z hlediska vnějších vlivů. (Široký, 2003)
- Pasivní (jízdní):
 - traťové,
 - vozidlové,
- Dynamické.

Analýzou všech kategorií dojdeme k nutným vstupním údajům pro teoreticky správný výsledek. Všechny odpory se standardně udávají v měrné veličině s rozměrem $\left[\frac{N}{kN}\right]$, kterou označíme obecně jako r :

$$F_{odpor} = G_{vozidlo}r = mgr [N] \quad (1)$$

Tato měrná veličina snižuje počet opakovaných výpočtů zejména pasivních odporů.

1.1. Pasivní odpory

1.1.1. Vozidlové odpory

Vozidlové odpory jsou složeny z dílčích odporů: odpor prostředí, odpor čepového tření a odpor valení kola po kolejnici. Všechny jsou závislé na aktuální rychlosti, konstrukci jednotlivých komponent. Zjišťování jejich matematického předpisu by však bylo zbytečné

složité, takže se spokojíme se složeným polynomem 2. stupně, jehož koeficienty jsou poměrně dostupným údajem zjišťovaným při výběhových zkouškách. (Široký, 2003)

$$r_{vozidlo} = a + bV + cV^2 \left[\frac{\text{N}}{\text{kN}} \right] \quad (2)$$

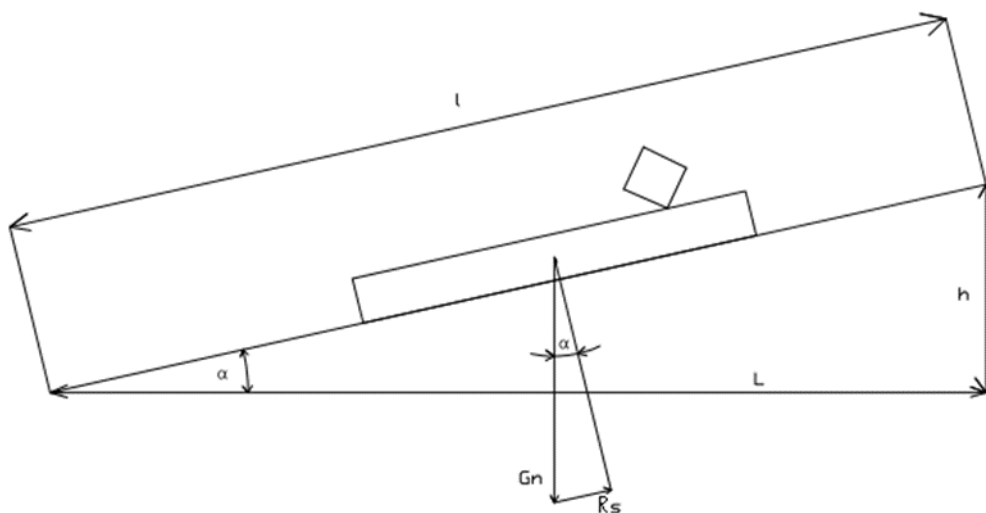
Pro rychlou představu uvádím tabulku, kterým vlivem jsou nejvíce poznamenány jednotlivé koeficienty.

Koeficient	Vliv
<i>a</i>	Valivý odpor kol a ložisek
<i>b</i>	Smýkání a neklidnost chodu
<i>c</i>	Aerodynamický odpor prostředí

Tab. 1.1 Fyzikální podstata koeficientů rovnice vozidlových odporů

1.1.2. Traťové odpory

Traťové odpory jsou dány parametry na straně infrastruktury, dělí se dle typu činitele na odpory sklonu, oblouku a tunelu.



Obr. 1.1 Rozklad tíhy drážního vozidla ve sklonu (Mlynařík, 2011)

Tíha vozidla na sklonu je rozložena na dvě složky. Složkou kolmou na rovinu koleje se zabývá odpor vozidla. Složka R_s rovnoběžná s rovinou koleje působí v podélné ose vlaku. Při pohybu vlaku do stoupání působí jako odpor.

$$r_{sklon} = \frac{R_s}{G} = 1000 \sin \alpha \left[\frac{\text{N}}{\text{kN}} \right] \quad (3)$$

Je-li zároveň sklon trati (s) vyjádřen v jednotkách promile, pak platí celá rovnice:

$$s = 1000 \frac{h}{l} \approx r_{sklon} \left[\frac{\text{N}}{\text{kN}} \right] \quad (4)$$

Můžeme říci, že měrný odpor ze stoupání (r_s) je číselně roven udávanému sklonu v promile. Matematickým vyjádřením odporu v negativním sklonu (při jízdě s kopce) je hodnota se záporným znaménkem. (Mlynařík, 2011)

Při průjezdu kolejového vozidla obloukem vznikne nezanedbatelná odporová síla. Tato síla je závislá na mnoha faktorech, především pak na poloměru oblouku (R), rozvoru vozidla a podvozku (b), rozchodu koleje (e) a velikosti převýšení. (Doleček, 2012)

$$r_{oblouk} = \frac{\varphi_A}{2R} \left(e + \sqrt{b^2 + e^2} \right) \left[\frac{\text{N}}{\text{kN}} \right] \quad (5)$$

kde φ_A je součinitel adhezního tření (obvykle 200 N/kN). Pro jednoduchost jsou používány obvykle tzv. Röcklovy vzorce, respektující především poloměr projížděného oblouku ve tvaru:

$$r_{oblouk} = \frac{650}{R - 55} \left[\frac{\text{N}}{\text{kN}} \right] \quad (6)$$

Odpor z jízdy v tunelu je způsoben vytlačováním sloupce vzduchu a jeho víření kolem vlaku. K jeho kvantifikaci užíváme empirický vzorec:

$$r_{tunel} = \frac{2}{p} \left[\frac{\text{N}}{\text{kN}} \right] \quad (7)$$

kde p je počet kolejí. (Široký, 2003)

1.2. Dynamické odpory

Dynamické odpory představují síly, které působí proti pohybu vozidla při změně rychlosti, přičemž rozlišujeme 2 typy těchto sil.

Zrychlení posuvných hmot je prostou aplikací pohybového zákona:

$$r_{posuv} = \frac{m_{vozidlo} a}{G_{vozidlo}} = \frac{a}{g} \left[\frac{\text{N}}{\text{kN}} \right] \quad (8)$$

Odpor zrychlení rotujících hmot je oproti tomu značně komplikovaný fenomén:

$$r_{rotace} = \left[\frac{\sum (J_{motor} i_c^2) + \sum J_{náprava}}{R_{kolo}^2} \right] \frac{a}{G_{vozidlo}} \left[\frac{\text{N}}{\text{kN}} \right] \quad (9)$$

kde J jsou hmotnostní momenty setrvačnosti rotujících částí, i_c je celkový převod mezi motory a nápravami a R_{kolo} je poloměr kola. Hodnoty v hranaté závorce jsou sčítány pro dosažení do výpočtu, proto se běžně nahrazují empirickým součinitelem rotujících hmot (ρ), jehož velikost nabývá 0,04 až 0,3 v závislosti na typu vozidla (Prachař, 2010; Široký, 2003).

Výsledný tvar dynamických odporů je tedy:

$$r_{dynamické} = \frac{a}{g} (1 + \rho) \left[\frac{\text{N}}{\text{kN}} \right] \quad (10)$$

1.3. Trakční síla

Je nutná pro překonání všech odporů, jak bylo uvedeno v úvodní partii. Velikost trakční síly je zásadním faktorem dynamiky soupravy a je závislá na mnoha proměnných. Zdrojem trakční síly jsou u konvenční elektrifikované železnice výhradně točivé elektrické stroje, z nichž nejčastěji instalovanými typy jsou:

- stejnosměrné – sériově a cize buzené,
- asynchronní s kotvou na krátko.

Konstrukce stroje zejména ovlivňuje závislost momentu na jeho úhlové rychlosti, resp. tažné síly na rychlosti celého vozidla. Tato závislost je uváděna jako tzv. trakční charakteristika. Lze z ní vyčíst maximální rychlost i hodnotu maximální trakční síly při dané rychlosti. Obecně je tedy každý motor strůjcem momentu na své hřídeli, pro který platí

$$P = M\omega [W, \text{Nm}, \text{s}^{-1}] \quad (11)$$

$$M = f(\omega) \quad (12)$$

Různé druhy motorů se liší především způsobem vytváření magnetického pole, buzením. V zásadě může jít o stroje se stejnosměrným tokem buzeným stejnosměrným

proudem nebo permanentními magnety. Mezi kmitočtem proudu, otáčkami a počtem pólů musí platit vztah

$$f = \frac{pn}{60} [\text{Hz}, 1, \text{ot./min}] \quad (13)$$

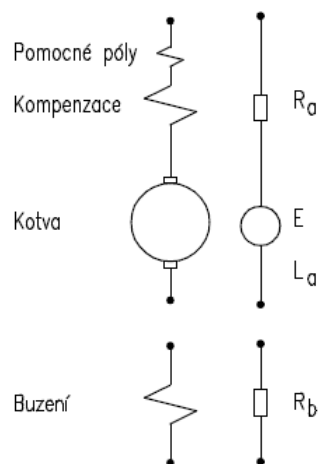
Jedná se zřejmě o stroje stejnosměrné a synchronní všech typů. Pokud je stroj buzen střídavým proudem s kmitočtem f_2 musí ze stejných důvodů platit vztah

$$f_1 = \frac{pn}{60} - f_2 [\text{Hz}, 1, \text{ot./min}, \text{Hz}] \quad (14)$$

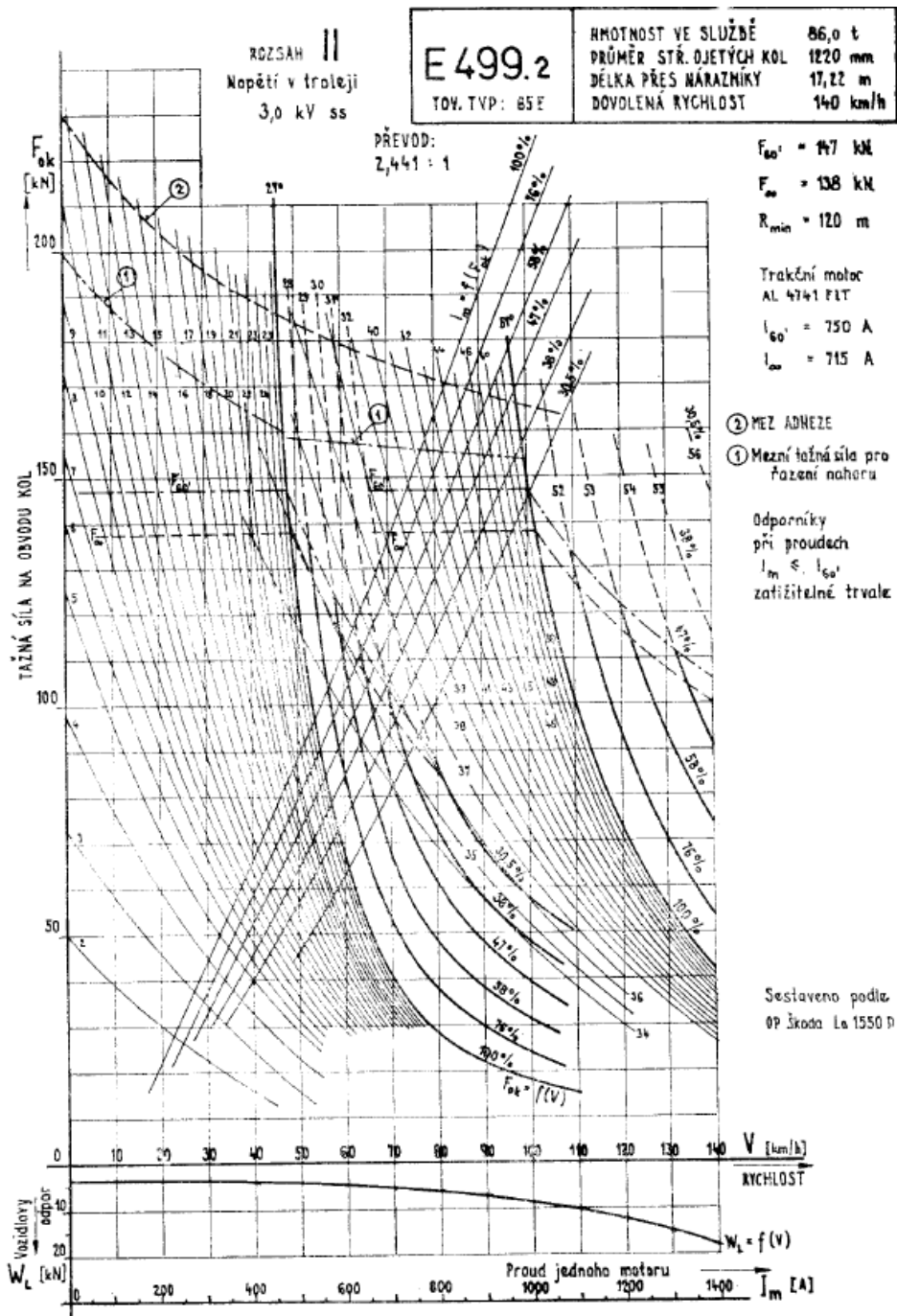
Jde o stroje asynchronní, kde splnění požadavku zajišťuje automaticky transformace proudu ze statoru do otáčejícího se rotoru, a o stroje střídavé, komutátorové, kde to podobně jako u stejnosměrných strojů zajišťuje komutátor. Oba typy se u elektrické trakce používají. (Danzer, 2004)

1.3.1. Odporová regulace se stejnosměrným motorem

Jedná se o robustní a jednoduchý způsob regulace, obecně však také neefektivní. Je založen na principu řízení napětí na motorech výběrem jejich řazení (sériové / paralelní) a předřazováním výkonových rezistorů. Odebíraný výkon je tedy volen diskrétně a všechny stupně mimo tzv. hospodárných, kdy nejsou odpory využity, maří značnou část energie na teplo.



Obr. 1.2 Náhradní schéma sériového motoru v ustáleném stavu (Danzer, 2006)

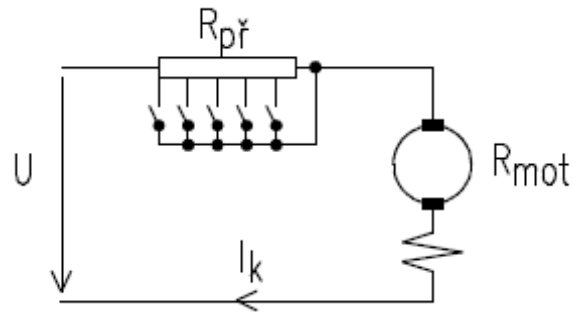


Obr. 1.3 Úplná trakční charakteristika lokomotivní řady E 499.2 (Široký, 2003)

Abychom tedy našli maximální tažnou sílu při dané rychlosti, musíme nejprve najít nejvyšší možný stupeň. Volba stupně je omezena jednak proudem a jednak pochopitelně adhezí. Pro důsledné modelování by přicházela v úvahu mapa všech stupňů s jejich funkčním předpisem a informací o mezní tažné síle pro řazení nahoru. Při pohledu na Obr. 1.3 je však evidentní, že takové množství informací je problematické opatřit, natož pro každé vozidlo nadefinovat.

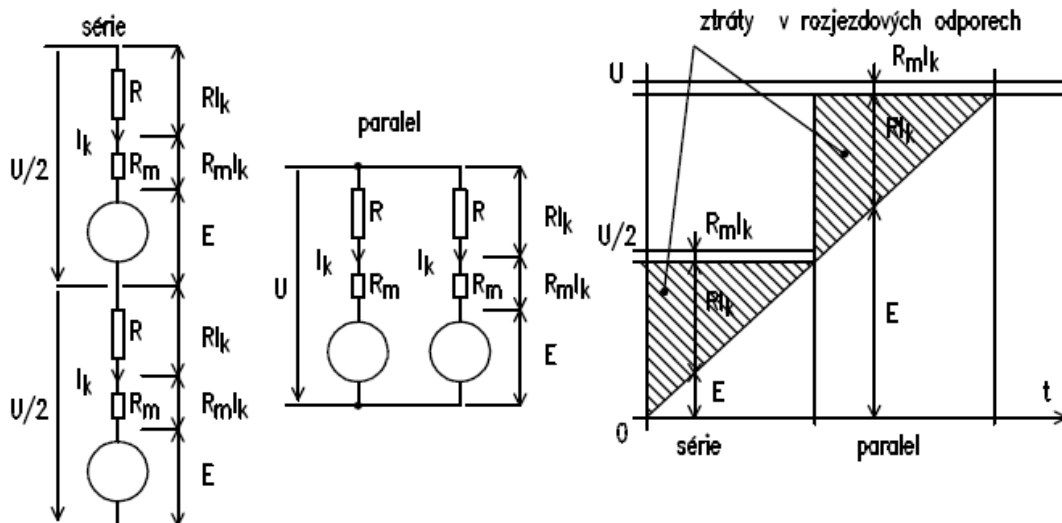
Střední hodnotu proudu procházejícího jedním trakčním motorem bychom zjistili ze spotřební charakteristiky, která bývá uvedena u trakční charakteristiky. Spotřební charakteristika popisuje závislost

$$I_{1TM} = f(F_{OK}) \quad (15)$$



Obr. 1.4 Zjednodušené schéma odporové regulace (Danzer, 2006)

Ztráty regulace stupňovitě klesají se snižujícím se předřazeným odporem až k dosažení nuly na hospodárném stupni, kdy jsou všechny odpory vyřazeny. Pokud vozidlo využívá různá skupinová řazení motorů, počet hospodárných stupňů odpovídá jejich počtu.

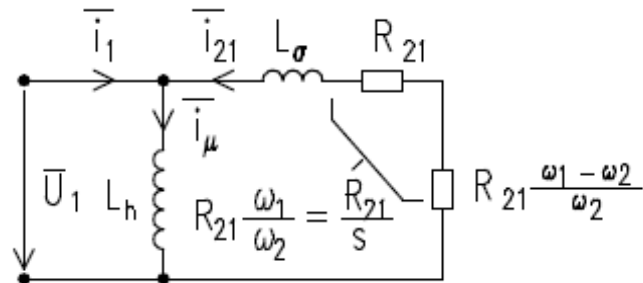


Obr. 1.5 Ztráty v rozjezdových odporech při skupinovém řazení motorů (Danzer, 2006)

1.3.2. Asynchronní motory s frekvenčním řízením

Pro trakční účely se využívají prakticky výhradně třífázové motory s kotvou nakrátko napájené z měničů proměnným napětím a kmitočtem. Tím se problematika pohonu v zásadě přesouvá z motoru (a podvozku) do měniče a jeho řízení (do strojovny).

U stejnosměrného motoru jsou zřetelně vyjádřeny obě momentotvorné složky, magnetický tok, resp. budicí proud, a proud v kotvě. Jejich prostorový vztah je dán v rozhodující míře provedením stroje a je proto prakticky stálý. U asynchronního motoru se toto vyjádření obvykle neužívá, protože vychází z veličin, které nelze na skutečném stroji měřit. Byly odvozeny výrazy pro moment i jinými cestami.



Obr. 1.6 Zjednodušené náhradní schéma jedné fáze (Danzer, 2008)

Rotorový odpor je rozdělen na dvě části a má to hluboký fyzikální význam. První složka R_{21} reprezentuje (přepočtený) odpor rotorového vinutí, který považujeme za konstantní. Ztráty, které na něm průtokem proudu vznikají ohřívají rotorové vinutí. Druhá část $R_{21} \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_2}$ je odpor „fiktivní“ a „ztráty“, které na něm vznikají průtokem rotorového proudu představují vnitřní mechanický výkon motoru. Takže

$$P = m R_{21} \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_2} I_{21}^2 \quad (16)$$

kde m je počet fází motoru, ω_1 je statorový kmitočet pevně spjatý s

$$\omega_1 = 2\pi f_1 \quad (17)$$

a ω_2 je rotorový kmitočet. Pro vnitřní moment M_i , jenž kromě činného odběru z hřídele stroje kryje ještě mechanické ztráty (ložiska, ventilace, ...)

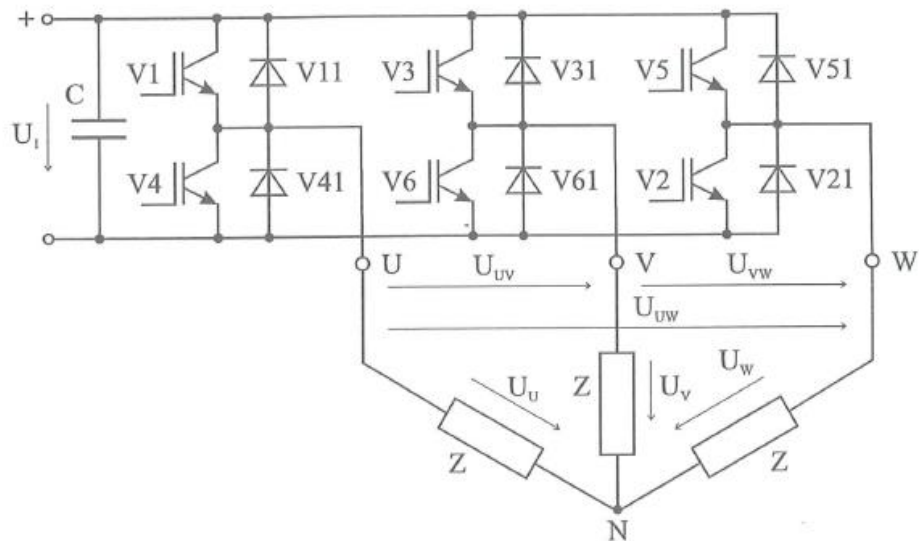
$$M_{hřidel} = M_i - \Delta M = M_i - \frac{\Delta P_{mech}}{\omega_m} \quad (18)$$

platí při zanedbání rozptylové indukčnosti

$$M_i = m p_p \frac{R_{21}}{\omega_2} I_{21}^2 \quad (19)$$

kde p_p je počet pólpárů. (Danzer, 2008)

Regulátorem asynchronního motoru je polovodičový střídač, který ze stejnosměrného obvodu kombinací různých modulací vytváří 3fázové napětí s žádanými průběhy pro efektivní chod stroje.



Obr. 1.7 Trojfázový střídač (Javůrek, 2003)

1.3.3. Přenos momentu

Tok momentu od motoru k obvodu kol může vést přes trvalý převod, hřídele a kloubová spojení. Tato zařízení zpravidla jsou sice rize mechanická, ale část energie je v nich také přeměněna na teplo. Jde o typické viníky tzv. aktivních ztrát (kap. 1). Zpravidla se účinnost tohoto soustrojí uvažuje s hodnotou

$$\eta_{\text{převodovka}} \cong 0,98[-] \quad (20)$$

Pro zjištění sumy tažné síly na obvodech kol (F_{OK}) všech hnaných náprav (m) z momentu motoru se účinnost zohledňuje spolu s velikostí převodu (i) a poloměrem kol (D_k). (Široký, 2003)

$$F = \frac{2M\eta_{\text{převodovka}}i}{D_k}m \quad (21)$$

1.3.4. Adheze

Dalším nezanedbatelným vlivem je adheze, tedy schopnost zúročit sílu při odvalování. Uvádí se jako koeficient μ udávající maximální poměr tečné síly na obvodu kola k adhezní tíze.

$$\mu = \frac{F_{max}}{G} [-] \quad (22)$$

Existuje řada empirických vztahů popisujících souvislost mezi aktuální rychlostí vozidla a koeficientem adheze, z nichž asi nejznámější je rovnice podle Curtise a Knifflera:

$$\mu = \frac{7500}{3,6v + 44} + 161 [-] \quad (23)$$

kde v vyjadřuje okamžitou rychlost vozidla [m/s]. Tímto vztahem lze poměrně dobře určit velikost koeficientu adheze. V nepříznivých případech však může být koeficient adheze mnohonásobně nižší, než udává tento vztah. (Mlynařík, 2011)

1.4. Brzdná síla

Je nutná pro tzv. provozní brzdění, tedy odrychlení za účelem snížení rychlosti jízdy nebo zastavení. Zajištění schopnosti brzdění je na rozdíl od trakční síly nutné pro dosažení bezpečnosti. Souprava nemůže započít jízdu, jestliže nesplňuje podmínky stanovené SJŘ, případně dalšími dopravními pomůckami a technickými normami.

Na železnici je v dnešní době brzděna celá souprava, a sice brzdou průběžnou ovládanou strojvedoucím nebo řídicím systémem centrálně. Tato zároveň musí zajistit brzdění i v případě přetržení soupravy. Akčním členem brzdění může být řada zařízení, která primárně rozdělujeme podle přenosu brzdné síly na adhezní a neadhezní.

1.4.1. Adhezní brzdy

Působí primárně na nápravy vozidla a brzdná síla je přenášena stejně jako v případě trakční síly adhezně. Maximální využitelná brzdná síla je tedy limitována, protože v případě zablokování nápravy je její brzdný účinek zlomkový. Naprosto dominantním zástupcem této skupiny jsou pneumatické brzdy založené na tření mezi dílem nápravy (kolem nebo kotoučem) a akčním členem, pro něž je omezení adheze dáno výrazem

$$F_{dyn} \leq \frac{N\mu}{f} [N, N, -, -] \quad (24)$$

kde F_{dyn} je přitlačná síla akčního členu, N je nápravová tíha a f je koeficient tření závislý obecně na rychlosti, materiálu a čistotě povrchů a dalších konstrukčních vlastnostech.

Velice významná je také možnost brzdění trakčními motory, tzv. elektrodynamická brzda. Každý elektrický stroj může při vhodném zapojení vnějších obvodů pracovat jako motor nebo jako generátor. Jelikož jde o adhezní brzdění, maximální brzdná síla nápravy je omezena dle vzorce 22.

1.4.2. Neadhezní brzdění

Prvním zástupcem je kolejová brzda pracující na principu třecí síly mezi pólovými nástavci magnetů, upevněných na rámu podvozku, které jsou magnetickou silou přitlačovány k hlavě kolejnice. Velikost brzdné síly závisí na délce magnetu, velikosti jeho buzení a na materiálu nástavců a kolejnice. Kolejnicové brzdy zpravidla nemají regulaci účinku, jsou ovládány binárně (zabrzděno-odbrzděno). Proto se nehodí jako brzdy provozní a na železnici se používají výhradně jako brzdy nouzové.

Druhým zástupcem jsou brzdy vířivé, které využívají síly působící na vodič s proudem v magnetickém poli. Proud, který působí brzdění dynamickými účinky indukují buď v kolejnicích nebo v brzdových kotoučích (pak se však jedná o adhezní brzdění). Nejčastěji se používají lineární vířivé brzdy zavěšené na podvozcích nad kolejnicemi. Vysoké nároky na spotřebu energie, které nejsou splnitelné běžnou vozovou baterií bez značného předimenzování, a signifikantní vliv na dopravní cestu jednak markantní změnou teploty kolejnice a potlačením magnetického pole některých prvků systému ATP a ATC však tento typ rovněž odsuzují pro použití převážně jako brzdou nouzovou. (Danzer, 2008)

2. Stávající výpočetní metody

2.1. ČSD V7

Pro účely tohoto předpisu se zejména z historických důvodů vypracovával tzv. redukovaný traťový profil, jehož smyslem bylo zahrnutí všech druhů traťových odporů a zejména zjednodušení analýzy snížením počtu bodů, ve kterých dochází ke změně traťových poměrů. Zjednodušeně řečeno se průměrovaly úseky s podobnou hodnotou sklonu všech odporů.

$$r_{redukovaný} = \frac{\sum r_{sklon} l_{sklon} + \sum r_{oblouk} l_{oblouk} + \sum r_{tunel} l_{tunel}}{\sum l_{sklon}} \quad (25)$$

Dále se stanovuje teoretický průběh rychlosti grafodynamickou metodou ČSD, případně v kritických úsecích s vysokými nároky na přesnost metodou s-V². Předpis se zmiňuje také o výpočetním algoritmu, uvádí však pouze požadavky na něj, nikoli jeho popis. Z průběhu rychlosti se zjistí teoretické jízdní doby.

Kapitola XIX uvádí aplikaci výpočtu tachogramu, ze které vyplývá, že probíhá v integračních krocích charakterizovaných projetým dráhovým intervalem. V každém kroku je zjištěno zrychlení dle tachogramu. Na základě měrné tažné (brzdné) síly, vypočtené dle vzorce 51, je stanoven jízdní stupeň.

Spotřebě elektrické energie se věnuje kapitola XV předpisu. Postup vede na sumu dílčích spotřeb počítaných v krocích. Dílčí spotřeba je dána okamžitým proudem protékajícím kotvami trakčních motorů a napětím daným voltampérovou charakteristikou pro předpokládaný jízdní stupeň.

Vzorec pro celkovou spotřebu na sběrači hnacího vozidla má pro střídavou soustavu tvar:

$$E_c = (1 + x) \frac{E_{trakce}}{\eta_{transformátoru} \eta_{usměřovač}} \cos \varphi + E_{topení} + E_{pobyt} [\text{kWh}] \quad (26)$$

kde x je poměrná spotřeba pomocných pohonů, η je účinnost příslušného zařízení a E_{pobyt} je energie spotřebovaná během pobytů vlaku kromě odběru topení. Pro stejnosměrnou trakci se vzorec zjednoduší o nadbytečné části:

$$E_c = (1 + x) E_{trakce} + E_{topení} + E_{pobyt} [\text{kWh}] \quad (27)$$

Energie pro vytápění se počítá v závislosti na průměrné teplotě ovzduší a typu vlaku. Vzhledem k době vydání předpisu se nepočítá s přítomností klimatizace.

2.2. Metoda dle zadaného GVD

Jde o způsob výpočtů uvedený ve studijní opoře k předmětu Energetika kolejové dopravy (Doleček, 2012) a vychází z publikace Energetika v dopravě (Trávníček, 1988).

2.2.1. Výpočet spotřeby

Základní veličinou je zde měrná spotřeba energie (A_T) vyjádřená rovnicí:

$$A_T = F_{tažná} l [Nm] \quad (28)$$

kde l je ujetá dráha a $F_{tažná}$ je získána z výrazu:

$$F_{tažná} = mgp_m [N] \quad (29)$$

Člen p_m je střední měrný jízdní odpor celého vlaku, který se skládá z měrného jízdního odporu vlaku na vodorovném přímém úseku trati (p_{0m}), dále z přírůstků měrného jízdního odporu vlivem jízdy v oblouku (p_r) a ve stoupání (p_s).

$$p_m = \frac{\sum p_{0m} l_0 + \sum p_r l_r + \sum p_s l_s}{l_{celková}} \left[\frac{N}{kN} \right] \quad (30)$$

Délka l_0 odpovídá délce pojižděné trakčním výkonem. Výsledným ukazatelem je průměrná měrná spotřeba (w_{NS}), k níž je ještě potřeba připočítat složku měrné spotřeby na rozjezd a brzdění ($w_{rozjezd}$) a složku měrné spotřeby pomocných pohonů ($w_{pomocné}$).

$$w_{NS} = \frac{p_m g}{3,6 \eta_{pohon} \eta_{napájecí\ soustava}} \left[\frac{Wh}{tkm} \right] \quad (31)$$

$$w_{rozjezd} = \frac{0,01072 \cdot (1 + \rho) v_{cílová}^2}{\eta_{rozjezd} l_{rozjezd}} \left[\frac{Wh}{tkm} \right] \quad (32)$$

$$w_{pomocné} = \frac{\kappa P_{hnací\ vozidlo} 10^3}{mv} \left[\frac{Wh}{tkm} \right] \quad (33)$$

kde ρ je součinitel rotujících hmot a κ je poměrný příkon pomocných pohonů, vytápění vlaku a osvětlení vztažený ke jmenovitému výkonu lokomotivy.

2.2.2. Výpočet elektrických veličin

Nejprve je uvedena metodika pro stejnosměrné systémy. Úbytek napětí na trakčních usměrňovačích závisí na jejich počtu (n), jmenovitém proudu jednotky (I_{n1}) a na napětí měřírny naprázdno (U_0). Vypočte se z výrazu:

$$\Delta U_{usm} = \frac{I_{celkový}}{nI_{n1}} AU_0 \frac{u_k \text{ transformátor}}{100} [\text{V}] \quad (34)$$

kde A je součinitel sklonu vnější charakteristiky usměrňovací jednotky a nabývá hodnot 0,4 až 0,6.

Dále je uveden vztah pro úbytek napětí na vstupu transformátoru vlivem reaktance napájecí sítě závislý na jmenovitém výkonu transformátoru jednotky (S_n) a zkratovém výkonu na primární straně (S_k).

$$\Delta U_{VN} = \frac{I_{celkový}}{I_{n1}} AU_0 \frac{S_n}{S_k} [\text{V}] \quad (35)$$

Výpočet úbytku napětí na trakčním vedení je řešen při nejméně příznivém provozním stavu, tedy vlaky s velkým odběrem proudu na stoupání a vzdálené od měřírny. Parametrem charakterizujícím vedení je měrný odpor (r_{TV}). Pak největší úbytek napětí zjistíme jako:

$$\Delta U_{max} = r_{TV} \sum_i I_i l_{TV,i} [\text{V}] \quad (36)$$

Pokud se týká úbytků na AC soustavě, uvažujeme trakční transformátor (dále jen TT) a parametry X_{TT} a $X_{přívod}$, což jsou reaktance přepočítané na napětí trakční soustavy:

$$\Delta U_{TT} = I_{TT} (2X_{přívod} + X_{TT}) \sin \varphi [\text{V}] \quad (37)$$

$$X_{přívod} = \frac{U_n^2}{S_k} [\Omega] \quad (38)$$

$$X_{TT} = \frac{u_k}{100} \frac{U_n^2}{S_n} [\Omega] \quad (39)$$

V kapitole 11 publikace je rozebrán výpočet energetických ztrát pro jednostranné napájení ve tvaru:

$$I = \frac{U - \sqrt{U^2 - 4Szx}}{2zx} [A] \quad (40)$$

kde z je měrná impedance trakčního obvodu, U je napětí v místě připojení TNS a x je vzdálenost odebírajícího vlaku od TNS. Aby šlo výraz vypočítat, musí platit:

$$S \leq \frac{U^2}{4zx} [A] \quad (41)$$

což je podmínka realizovatelnosti dodávky výkonu. Pro oboustranně napájený úsek o délce L byl odvozen vzorec závislý na vzdálenosti od první TNS (x_1).

$$I_1 = \frac{U - \sqrt{U^2 - 4S \frac{L - x_1}{L} zx_1}}{2z \cdot x_1} [A] \quad (42)$$

$$I_2 = \frac{U - \sqrt{U^2 - 4S(L - x_1)z \frac{x_1}{L}}}{2z(L - x_1)} [A] \quad (43)$$

2.2.3. Rekuperovaný výkon

Výpočet vychází z principu přeměny části kinetické energie (A_{kin}) na energii elektrickou.

$$A_{kin} = 0,01072(1 + \rho)m \left(\frac{v_{počátek}}{3,6} \right)^2 [Wh] \quad (44)$$

Pro jízdu výběhem na dráze l by platila rovnost trakční energie ($A_{trakční}$) vynaložené na dosažení $v_{počátek}$ a energie odevzdané ztrátám z působení odporů (r_0), které jsou počítány pro střední rychlost výběhu:

$$A_{trakční} = A_{kin} = 2,724mr_0l [Wh] \quad (45)$$

Pro největší hodnotu rekuperovatelné energie pak platí výraz:

$$A_{rekuperace} = m[0,01072(1 + \rho)(v_{počátek}^2 - v_{koncová}^2) - 2,724l_{rekuperace}r_0] [Wh] \quad (46)$$

3. Použitá výpočetní metoda

Metody představené v předchozí kapitole zřejmě vedou na výsledek, nicméně není pomocí nich možné skutečně simulovat aktuální poměry. Metoda podle předpisu V7 například vůbec nepočítá s elektrickými vlastnostmi vedení, rekuperací a zaměřuje se spíše na technologický pohled na problém. Metoda druhá je v tomto směru poměrně komplexní, nicméně jednotlivé výpočty (spotřeba, napětí, ztráty) nejsou nijak provázány, přičemž z fyzikálního hlediska vychází ze společného základu a jsou spolu těsně spjaty. Rovněž vůbec není bráno v potaz vzájemné ovlivnění napájecích poměrů soupravami v úseku, zda například rekuperovaný výkon najde svůj spotřebič. Navrhuji proto zavést následující metodu výpočtu, která respektuje určité kroky zmíněných postupů, nicméně v jádru se vymyká.

3.1. Základní požadavky

Metoda musí být co možná univerzální, zejména z hlediska použitého napájecího systému a jeho frekvence. Počet vlaků v úseku by neměl být omezen oproti realitě. Musí být možné přímo simulovat všechny typy a kombinace souprav, které se pohybují na síti SŽDC, a ostatní by měly jít přidat modulárním způsobem beze změny ostatních komponent, nebo architektury celého programu. Rekuperace musí být podporována. Hlavním výstupem simulace jsou tyto veličiny:

- napětí na sběrači¹ a proud jím procházející u všech souprav,
- proudy odebírané z TNS,
- upozornění týkající se překročení limitů napětí a proudů.

Zjednodušující předpoklady:

- geometrické poměry všech souběžných kolejí jsou stejné,
- výpočty budou probíhat s časovým krokem 1 vteřiny, v nichž se soupravy pohybují s konstantními zrychleními,

¹ Napětí měřené mezi trolejovým drátem v místě odběru a kolejovým zpětným vedením v téže vzdálenosti od počátku úseku. Z tohoto hlediska zjednodušíme soupravu na 2bodově připojený prvek.

- vyšetřovaný úsek není nijak ovlivňován zvnějšku ani sousedními úseky, tedy napáječe týkající se tohoto úseku jsou nezávislé na ostatních aktivitách příslušných TNS,
- dynamické průběhy elektrických veličin jsou místo exponenciál zjednodušeny na skokové změny, jejich harmonické průběhy jsou vyjádřeny symbolicky pomocí fázorů.

3.2. Vozidla

Pro simulaci jsou podstatné všechny soupravy interagující s trakční soustavou. Patří sem zejména vlaky a posuny hnané vozidlem elektrické trakce a soupravy využívající elektrické předtápěcí zařízení připojené k TV. Rozdělme příkon libovolné soupravy takto:

$$P_{\text{příkon}} = P_{\text{trakce}} + P_{\text{ztráty}} + P_{\text{pomocné pohony}} + P_{\text{ostatní}} \quad (47)$$

kde $P_{\text{ostatní}}$ a $P_{\text{pomocné pohony}}$ se liší tím, že zařízení označená jako ostatní odebírají příkon nezávisle na stavu trakčního soustrojí, jde například o klimatizaci, vytápění, svícení apod. Naproti tomu pomocnými pohony označují zařízení, která mají přímou (ventilátory) nebo polopřímou (kompresory) souvislost s trakčním obvodem hnacího vozidla. Dalším členem jsou ztráty, které nelze zanedbat – zejména ztráty dané způsobem regulace. Chování souprav (jejich požadavek na příkon) jsou v čase determinovány grafikonem a v prostoru pak polohou, která odkazuje na poměry dopravní cesty.

3.3. Sestava tachogramu

Tachogramy jsou vypočítávány pro jednotlivé jízdní úseky ohraničené pobyty ve stanicích / zastávkách nebo začátkem nebo koncem trasy. Pro výpočet jsou nutné následující vstupní údaje:

- parametry soupravy,
- parametry tratě,
- počáteční a koncový bod včetně obou okrajových rychlostí.

Výsledkem výpočtu je sada snímků zachycujících jízdu vlaku s časovou roztečí odpovídající kroku simulace, tedy 1 vteřině. Snímky mohou být různých typů, ale pro další zpracování poskytují homogenní rozhraní, z něhož lze získat:

- polohu čela vlaku,
- rychlost,
- směr (k počátku / ke konci),
- transformaci na elektrickou reprezentaci soupravy vzhledem k napájecí soustavě.

První 3 body jsou záležitostí mechaniky, zatímco poslední bod informuje o požadavcích na elektrické napájení za účelem uspokojení mechanických veličin a ztrát v daném okamžiku. Řešení tachogramu tak zároveň poslouží pro navazující výpočet elektrických poměrů.

Tachogram je řešen výhradně pro jízdní strategii typu obálková jízda. Ta je charakterizována nejkratší dobou jízdy, takže je vždy:

- využíván maximální výkon pro dosažení rychlosti rovné aktuálnímu limitu,
- pojížděna nejdelší možná vzdálenost s maximální rychlostí a
- využíván maximální brzdový výkon pro deceleraci k místu s nižší dovolenou rychlostí nebo pobytu.

Tuto strategii jsem vybral záměrně jednak pro svoji jednoznačnost a jednak předpokládám, že klade nejvyšší nároky na napájecí soustavu, takže z tohoto pohledu umožní přímo řešit nejhorší možný případ situace elektrických veličin. V simulaci není obálková jízda implementována zcela dokonale zejména z důvodů vyplývajících z požadavku na konstantní časovou diskretizaci.

Úseky jízdy jsou rozděleny do 3 skupin: zrychlování, jízda konstantní rychlostí a brzdění. Odporů jsou vypočteny dle kapitoly 1 s drobnou modifikací. Souprava není uvažována jako hmotný bod, nýbrž jako shluk bodů představujících jednotlivá vozidla. Tyto jsou od sebe vzdáleny na délky jednotlivých vozů a působí na ně odporů odpovídající jejich skutečné poloze v rámci soupravy i úseku. Pokud se bude souprava nacházet v blízkosti počátku nebo konce úseku a vypočtené polohy vozidel leží mimo načtenou oblast, pak jsou dotyčná vozidla zanedbána a jejich odporů se uplatní pouze po vstupu nebo před výstupem z oblasti.

3.3.1. Zrychlování

Vstupní podmínky jsou:

- rychlost nižší než stanovený limit daný ze strany tratě a soupravy,
- schopnost vyvinout tažnou sílu = přítomnost hnacího vozidla,
- vlak je mezi hraničními body tachogramu.

Operace musí probíhat sekvenčně, protože stav v každém snímku je závislý na předchozím snímku. Pro zjištění nového stavu jsou využity následující rovnice.

$$v_{nová} = v_{aktuální} + a\Delta t = v_{aktuální} + a \quad (48)$$

$$a = \frac{a_{trakce} - a_{statické\ odpory}}{1 + \rho} = \frac{F_{trakce} - F_{statické\ odpory}}{m(1 + \rho)} \quad (49)$$

$$d_{nová} = d_{aktuální} + v_{aktuální}\Delta t + \frac{1}{2}a\Delta t^2 = d_{aktuální} + v_{aktuální} + \frac{a}{2} \quad (50)$$

Podmínky pro ukončení jsou velmi jednoduché; další krok nebude počítán, pokud v aktuálním byl dosažen rychlostní limit nebo koncový bod tachogramu. Pokud rychlost v posledním snímku překračuje rychlostní limit, a zároveň tento limit není nižší než dosažená rychlost v předposledním snímku, je zřejmé, že byla dosažena cílová rychlost a není potřeba brzdit. Proto je konečná rychlost upravena, aby odpovídala limitu.

Tvar funkce, kterou musí souprava pro sestavení průběhu akcelerace poskytovat, je:

$$F_{tažná,max} = f(v) \quad (51)$$

3.3.2. Brzdění

Vstupní podmínky:

- schopnost vyvinout brzdou sílu,
- poslední snímek z předchozího průběhu překračuje rychlostní limit v daném místě,
- pozice vlaku mezi hraničními body tachogramu.

V rámci této procedury je hledána optimální brzdá křivka pro dosažení cílové rychlosti nejbližše před nebo na úrovni místa s nižší rychlostí nebo místa pobytu. Navrhnul jsem algoritmus, který hrubou silou hledá nejzazší snímek, ve kterém je třeba aktivovat brzdu. Jde o poměrně exaktní operaci, protože velikost odrychlení je počítána zvlášť v každém snímku s ohledem na možnosti vozidel a podmínky dopravní cesty.

Brzdění vždy vychází z dosavadního průběhu (vlak nikdy nezapočne jízdu v daném úseku vyšší než povolenou rychlostí), takže je pro každý předchozí snímek paralelně sestaven průběh decelerace jednotlivě podle těchto rovnic:

$$v_{nová} = v_{aktuální} - a\Delta t = v_{aktuální} - a \quad (52)$$

$$a = \frac{a_{brzdění} + a_{statické\ odpory}}{1 + \rho} = \frac{F_{brzdění} + F_{statické\ odpory}}{m(1 + \rho)} \quad (53)$$

$$d_{nová} = d_{aktuální} + v_{aktuální}\Delta t - \frac{1}{2}a\Delta t^2 = d_{aktuální} + v_{aktuální} - \frac{a}{2} \quad (54)$$

kde brzdná síla, hmotnost a součinitel rotujících hmot jsou dány parametry soupravy a statické odpory závisí na soupravě a trati.

Je vybrán časově poslední snímek, z něhož se podaří včas dobrzdit. Jelikož pravděpodobnost dobrzdění přesně v cílovém bodě je mizivá, doplňují se snímky jízdou v režimu konstantní (cílové) rychlosti, jejíž tvorba je popsána v následující kapitole. Pokud není možné dobrzdit ani od prvního snímku dosavadního průběhu, znamená to, že zvolená počáteční rychlost sice není nad aktuálním limitem, ale nachází se nad obálkovou brzdou křivkou a je potřeba ji snížit. Tato situace může nastat pouze u prvního tachogramu v rámci jízdy soupravy, každý další (pokud existuje) začíná z pobytu, a má tudíž počáteční rychlost nulovou.

Tvar funkce, kterou musí souprava pro sestavení průběhu odrychlení poskytovat, je:

$$F_{brzda,max} = f(v) \quad (55)$$

3.3.3. Jízda konstantní rychlostí

Vstupní podmínkou je pouze poloha vlaku mezi hraničními body tachogramu. Snímky jsou vytvářeny až do vybraného koncového bodu. Rychlost je v nich udržována přesně na požadované hodnotě. Souprava tedy vyvíjí brzdou nebo tažnou sílu ekvivalentní síle statických odporů. Dynamické odpory v takovém případě nevznikají, viz. kap. 1 a 1.2.

Ve většině kroků nebude požadavek na maximální výkon v režimu jízdy nebo brzdy, snímky jsou proto vytvářeny s informací o poměrném využití odpovídajícího režimu, což se v dalším zpracování snímku (u korektně namodelované soupravy) patřičně projeví na elektrické reprezentaci vůči napájecímu vedení. Jelikož jsou ve výpočetní technice operace

s desetinnými čísly zatíženy systematickou chybou, nový stav každého snímku není přesně přepočítáván jako výsledek zápolení dvou protivných silových vektorů, nýbrž prostě idealizován takto:

$$v_{nová} = v_{aktuální} \quad (56)$$

$$d_{nová} = d_{aktuální} + v_{aktuální}\Delta t = d_{aktuální} + v_{aktuální} \quad (57)$$

Skutečný limit daný tratí a soupravou není při sestavě v tomto režimu kontrolován a je předpoklad, že se nenachází pod stanovenou hodnotou v žádném bodě vymezeného úseku. Je zřejmé, že zvolená rychlost nesmí být nulová, nehybná soustava by jakoukoli vzdálenost nepřekonala v reálném čase.

3.4. Traťový úsek

Úsekem se rozumí souvislá část trati, ve které je poloha jednoznačně identifikovatelná vzdáleností od počátku a která je charakterizovaná těmito parametry:

- elektrické parametry vedení,
- parametry napájecího systému,
- parametry dopravní cesty,
- grafikon dopravy.

Ztráty v traťovém úseku určíme jednak kvůli porovnání různých variant a jednak kvůli stanovení napětových úbytků ovlivňujících napětí na sběračích. Jsou pouze elektrického rázu. Pokud půjdeme podél toku výkonu, přichází v úvahu postupně ztráty v napájecí stanici a v trakční soustavě. Obojí jsou závislé na konstrukci a na procházejícím proudu (Ohmův zákon). Ztráty v trakční soustavě jsou dále dány polohou aktivních souprav.

Kolejiště bude bráno jako ekvipotenciální úsečka, veškeré úbytky promítneme do trolejové sestavy, což je matematicky ekvivalentní. Ze své podstaty je vyloučena simulace více systémů v jednom úseku, takže údaje typu frekvence, limity napětí a proudu budou vždy konstantní.

Proud, který protéká soupravami, je ovlivňován požadavkem na příkon, ale také napětím na sběrači. Bohužel se nemůžeme spokojit pouze s hodnotou příkonu, protože

voltampérové charakteristiky vozidel mohou nabývat libovolných průběhů. Situaci bych popsal těmito schematickými rovnicemi:

$$\hat{P}_{\text{přikon}} = \hat{U}_{\text{sběrač}} \hat{I}_{\text{žádaný}} \quad (58)$$

$$\hat{U}_{\text{sběrač}} = \hat{U}_{\text{stabilní}} - \hat{U}_{\text{ztráty}} \quad (59)$$

$$\hat{I}_{\text{žádaný}} = f(\hat{U}_{\text{sběrač}}) \quad (60)$$

Napětí na sběrači je dynamicky závislé na proudu soupravy. Exaktní analytické řešení při znalosti všech elektrických charakteristik by bylo možné, ačkoli náročné. Nicméně pak by byla ztracena velká část univerzality. Metoda by nemohla být využita pro libovolnou (v době tvorby práce neznámou) charakteristiku. Domnívám se, že tento požadavek je možné naplnit pouze s využitím numerických metod.

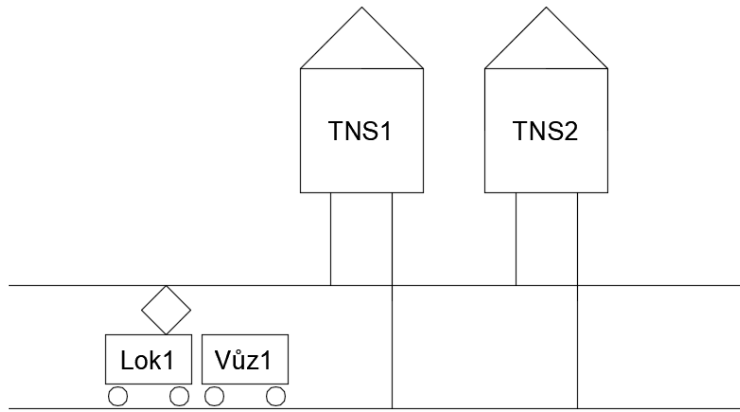
3.4.1. Topologie obvodu

Obvod bude syntetizován jako planární, tvořený jednoduchými smyčkami, kde každá má maximálně dva sousedy. Žádná část obvodu nebude mimo smyčku. Jeho tvar tak připomíná řetěz. Větve obvodu rozdělme na:

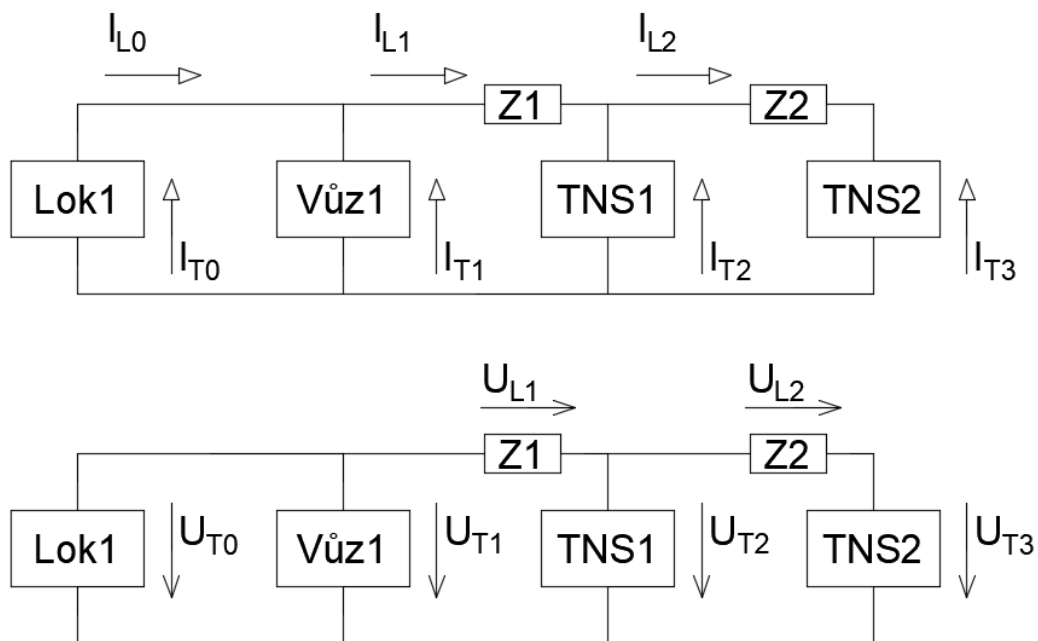
- podélné – unikátní pro každou smyčku,
- příčné – sdílené se sousedními smyčkami, pokud existují.

Jak jsem zmínil v předchozí kapitole, kolejiště bude ekvipotenciální, takže v jedné skupině podélných větví nebudou nikdy umístovány žádné prvky. Ve druhé skupině budou umístěny úsekové impedance napájecí a zpětné soustavy a konečně v příčných větvích budou umístěny všechny prvky spojující trolejové napájení s kolejištěm, tedy soupravy a stacionární elektrická zařízení.

Řazení příčných prvků odpovídá fyzickému pořadí od počátku ke konci úseku. Jednotlivá vozidla všech souprav jsou řazena jako samostatné větve. To znamená, že i vozy jsou elektricky připojeny přímo na napájecí soustavu a musí být s tímto ohledem modelovány.



Obr. 3.1 Příklad fyzického uspořádání napájeného úseku



Obr. 3.2 Schematické zobrazení obvodu sestaveného dle Obr. 3.1

Na Obr. 3.2 jsou záměrně vyznačeny směry proudů a napětí, protože jsou pro výpočet systémově závazné. Veličiny jsou indexovány počátečními písmeny anglického vyjádření směrové příslušnosti (*longitudinal* = podélný a *transversal* = příčný). Ze schématu mj. vyplývá, že mezi vozidla nejsou vkládány podélné impedance, mají společné místo připojení.

Příčná zařízení, jejichž číselná hodnota protékajících proudů je kladná, jsou v dané situaci zdroji a naopak. U podélných impedancí je zřejmé, že znaménka napětí a proudů budou vždy ve shodě a budou vždy spotřebiči.

3.4.2. Původní koncept řešení

Celý úsek by se řešil pomocí metody smyčkových proudů, protože vždy bude přítomen alespoň jeden zdroj napětí – napájecí stanice. Rekuperující vozidla převedeme rovněž na zdroje napětí. Pro naprostou univerzálnost by musely všechny zdroje definovat pouze jednu funkci:

$$\hat{U}_{zdroj} = f(\hat{I}_{odebíraný}) \quad (61)$$

Tato funkce by byla dále závislá na ztrátách a v případě rekuperujících vozidel na jejich aktuálních výkonových dispozicích. Aktivní soupravy, které odebírají výkon, by musely definovat pouze funkci popsanou rovnicí 60 a byly by pro tuto metodu zjednodušeny na impedanci.

$$\hat{Z}_{souprava} = \frac{\hat{U}_{sběrač}}{\hat{I}_{žádaný}} \quad (62)$$

Sestavením a kalkulací smyček však nezjistíme skutečné výsledné hodnoty, protože metoda sama vede k analýze pouze lineárních obvodů. Výsledné proudy ze zdrojů a napětí na odběrech proto budou znovu podrobeny rovnicím 60 a 61. Celý proces pak bude iterativně opakován, dokud nebude dosažena zvolená přesnost výsledku každé hledané veličiny:

$$\begin{aligned} & (\forall \hat{U}_{sběrač}: |\hat{U}_{sběrač; n} - \hat{U}_{sběrač; n-1}| < \text{přesnost}) \\ & \bigwedge (\forall \hat{I}_{zdroj}: |\hat{I}_{zdroj; n} - \hat{I}_{zdroj; n-1}| < \text{přesnost}) \end{aligned} \quad (63)$$

kde n je číslo aktuální iterace. Všechny funkce pak musí splnit pouze podmínku spojitosti na intervalu vstupních hodnot. Stanovení intervalu vstupních hodnot je individuální, protože záleží na umístění prvku z hlediska topologie obvodu. Přehled je uveden v Tab. 3.1.

<i>Typ prvku</i>	<i>Vstupní veličina</i>	<i>Podélné řazení</i>	<i>Příčné řazení</i>
Zátěž (impedance)	napětí (V)	$10^{-6} \dots U_{max}$	$- U_{max} \dots U_{max}$
Zdroj	proud (A)	nemá význam	$0 \dots I_{max}$

Tab. 3.1 Definiční obor hodnot prvků v sestavovaném obvodu

Funkce zátěže nemusí být definována pro absolutní hodnotu proudu 0 ampér, protože každá reálná součástka by měla ustálenou / fázorovou návratovou absolutní hodnotu napětí také nulovou a za těchto podmínek by navazující rovnice 62 stejně neměla řešení.

Tento koncept jsem rozvíjel většinu času tvorby práce až do chvíle, kdy jsem celý model naimplementoval a testováním zjistil, že je pro dané účely zcela nevhodný. Jednak bylo problematické namodelovat zdroj s usměrňovačem (měnič, rekuperující souprava na DC systému) tak, aby měl svou charakteristiku nadefinovanou v souladu s tabulkou. Ale především byl výpočet obvodu nesmírně volatilní takřka za všech podmínek. Pokud se například v obvodu nacházely dvě napájecí stanice s jednou odebírající soupravou mimo společný úsek (Obr. 3.1), pak napájecí stanice, v jejímž úseku nebyl odběr okamžitě začala napájet sousední – zatíženou – jejíž napětí kleslo o vnitřní ztráty. V následující iteraci měl proto její proud záporné znaménko, což se projevilo na značném růstu napětí nad nominální hodnotu. Pak už obvod nezastavitelně osciloval mezi limity napětí obou TNS.

Pokoušel jsem se hledat způsob, jak výpočty stabilizovat. Bez úspěchu jsem limitoval změny hodnot mezi iteracemi. Dále se mi z různých důvodů nepodařilo aplikovat prediktivní způsob výběru nové hodnoty pomocí jiných numerických metod (regula falsi, Newtonova metoda tečen), takže jsem se rozhodl koncept smyčkových proudů zcela opustit.

3.4.3. Výsledný koncept řešení

Nový a po všech stránkách lepší způsob využívá pro řešení externí open-source knihovny SpiceSharp od Svena Boulangera, která je k dostání na úložišti Github pod MIT licenci. Jak z názvu vyplývá, jde o adaptaci výpočetního prostředí Spice pro C# respektive doménu .NET.

Jedinou nevýhodou je fakt, že kompletní výpočet si již čtenář nebude moci provést na papíře bez důkladného studia této knihovny, což na druhou stranu klidně na zmíněném úložišti může provést. Nicméně výhody, které knihovna přináší, zcela převažují.

Topologie obvodu zůstává v zásadě stejná, až na dělení soupravy. Nyní jsou všechna vozidla soupravy zahrnuta v jednom dílčím obvodu (*subcircuit*), ale stále platí, že v něm jsou všechna spojena paralelně přímo na napájecí soustavu. Co se však mění zcela, je pojetí jednotlivých zařízení. Tato nemusí implementovat konkrétní rovnici, nýbrž musí být transformovatelná do součástek, které knihovna podporuje.

Typ prvku	Význam	Vybrané parametry
<i>BJT</i>	bipolární tranzistor	kapacity, β
<i>Capacitor</i>	kapacitor	C
<i>Diode</i>	dioda	kritické napětí, saturační proud
<i>CurrentControlled Currentsource</i>	proudem řízený zdroj proudu	koeficient zesílení
<i>CurrentControlled Voltagesource</i>	proudem řízený napěťový zdroj	koeficient zesílení
<i>Currentsource</i>	nezávislý zdroj proudu	I_n
<i>Inductor</i>	cívka	L
<i>MOSx</i>	různé typy MOS tranzistorů	kapacity, proudy jednotlivými přechody
<i>MutualInductance</i>	vzájemná indukčnost	k
<i>Resistor</i>	rezistor	R
<i>Subcircuit</i>	dílčí obvod	libovolná kombinace prvků
<i>VoltageControlled Currentsource</i>	napěťově řízený zdroj proudu	koeficient zesílení
<i>VoltageControlled Voltagesource</i>	napěťově řízený zdroj proudu	koeficient zesílení
<i>Voltagesource</i>	nezávislý zdroj napětí	U_n

Tab. 3.2 Vybrané elektronické prvky implementované knihovnou SpiceSharp

4. Model soupravy

Souprava je základním členem, se kterým trať interaguje. Rozeznáváme 3 stavy, ve kterých se může nacházet:

- jízda s aktivním tahem,
- jízda s brzdovým účinkem
- souprava ve výběhu (s nulovým mechanickým výkonem).

Souprava musí umět zhodnotit své výkonové schopnosti a také se transformovat v elektrickou reprezentaci. Při všech operacích je souprava vlastně jen agregátorem informací od jednotlivých členů soupravy – vozidel.

Ačkoli by bylo zajímavé věrně modelovat například trakční charakteristiky a jejich deformace pro všechny druhy motorů, regulací a také způsobů řízení, takové ambice si v rozsahu diplomové práce nebudu klást. V kap. 3.1 jsem si vzal za cíl maximální univerzálnost a stejně důležitým aspektem je podle mne také obsluhovatelnost. Nemá význam vytvořit simulátor, se kterým nikdo nebude chtít pracovat, protože do něj bude stěží získávat detailní data o vozidle, která navíc nebudou přenosná na jiné vozidlo.

Rozhodl jsem se proto jít průhlednější cestou, univerzálně použitelnou pro libovolné vozidlo včetně zahraniční provenience. Parametry budou pro obsluhu srozumitelné a pro případnou rychlou zběžnou analýzu také odhadnutelné.

4.1. Tažná síla

Mechanický výkon je důležitý takřka při všech operacích s HV. Vychází z ideální trakční charakteristiky:

$$P_{mech} = \sum (M\omega)_{trakční\ motor} = F_{tažná} v_{souprava} \quad (64)$$

Mechanický výkon je provázán se jmenovitým výkonem vozidla P_n přes rovnici:

$$P_{tah,max} = \eta_{motoru} \eta_{převodovka} P_n \quad (65)$$

Při sestavě zrychlování tachogramu je od hnacích vozidel zjišťována maximální tažná a brzdná síla. Pro větší přesnost by funkce předepsaná rovnicí 51 měla být závislá také na

napětí na sběrači, neboť reálně k němu strojvedoucí na „měkčích“ systémech musí přihlížet a přizpůsobit odebíraný výkon, aby napětí nekleslo pod stanovenou mez. Tato funkcionalita by sice šla implementovat, nicméně existují 3 důvody, proč jsem od ní ustoupil (seřazeno od nejnižší závažnosti):

- Ve vstupních datech vozidla by vznikla dimenze, podle které je vozidlo řízeno.
- Jízdní doby a tachogramy by byly závislé na aktuálních elektrických poměrech, což by mj. znamenalo, že před samotnou simulací by nebylo jisté, zda souprava například stihne dojet do koncového bodu před půlnocí.
- Soupravy by se v aktuálním snímku vzájemně ovlivňovaly nejen svými elektrickými charakteristikami, ale už v jejich syntéze na základě trakčních charakteristik a je snadné si představit, jak jednoduše by se takto ovlivněný výpočet rozkmital. Zavedení další nadřazené zpětné vazby nad výpočtem elektrických poměrů by jistě prodloužilo výpočet, ale především by s největší pravděpodobností vedlo na značnou nestabilitu a nejednoznačnost řešení.

Maximální tažná síla je omezena 3 faktory

- maximální výkon,
- adheze,
- maximální povolená tažná síla vozidla (konstanta).

Výsledný vzorec tedy vznikne v této podobě:

$$F_{\text{tažná,max}} = \min \left(G \left(\frac{7500}{3,6v + 44} + 161 \right), \eta_{\text{motor}} \eta_{\text{převodovka}} \frac{P_n}{v}, F_{\text{limit}} \right) \quad (66)$$

4.2. Brzdná síla vozidel

Při zjišťování maximální brzdné síly, což vyžaduje funkce 55, jsou sčítány všechny dostupné provozní druhy brzd na vozidle. U vagonů jsou to pouze pneumatické brzdy, zatímco u hnacích vozidel je počítáno také s brzděním motory. Jelikož oba typy jsou adhezní, výsledná síla je opět adhezním koeficientem limitována:

$$F_{\text{brzda,max}} = \min \left(G \left(\frac{7500}{3,6v + 44} + 161 \right), F_{\text{EDB}} + F_{\text{pneu brzda}} \right)$$

4.2.1. Stanovení přitlačné síly pneumatických brzd

Problematika brzdění je zúžena na výpočet maximální brzdné síly. Obvykle dostupným parametrem vozidla je počet náprav (n), typ brzd a odpovídající tzv. brzdná hmotnost (B) v tunách. Jiné parametry jsou příliš specifické a tudíž nekomfortní pro naše použití. Brzdná hmotnost je definována jako hmotnost vozidla, kterou je brzda daného vozidla schopna ubrzdit na předepsané zábrzdě vzdálenosti při takové počáteční rychlosti a na takovém spádu, pro které je v tabulkách brzdících procent předepsáno pro tuto zábrzdnou vzdálenost a příslušný způsob brzdění plných 100 %. (Antonický, 1984)

Vodítko jsem našel ve směrnici UIC 544-1. Sice zde chybí kapitola pro přímý výpočet síly z B , nicméně lze použít následujících vzorců:

$$B = \frac{\sum F_{dyn} k}{g} [t] \quad (67)$$

$$k = a_0 + a_1 F_{dyn} + a_2 F_{dyn}^2 + a_3 F_{dyn}^3 [-] \quad (68)$$

kde F_{dyn} je přitlačná síla jedné zdrže² a koeficienty a_x jsou tabelovány pro brzděné zdrže typu Bg (dělené) a Bgu (vícekrát dělené).

Typ zdrží	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃
Bg	2,145	-5,38·10 ⁻²	7,8·10 ⁻⁴	-5,36·10 ⁻⁶
Bgu	2,137	-5,38·10 ⁻²	8,32·10 ⁻⁴	-6,04·10 ⁻⁶

Tab. 4.1 Koeficienty přitlačné síly špalíkových brzd (International Union of Railways, 2004)

Výsledek pro jednu zdrž je tedy kořenem rovnice:

$$-B + a_0 F_{dyn} + a_1 F_{dyn}^2 + a_2 F_{dyn}^3 + a_3 F_{dyn}^4 = 0 \quad (69)$$

který hledám iterativním řešitelem kořenů s přesností na dvě desetinná místa při načítání parametrů vozidel. Výsledek výpočtu jsem testoval a konfrontoval s tabulkou v příloze E směrnice.

Pro kotoučové brzdy je uveden vzorec

² Čtyřnápravový vůz je standardně vybaven 16 zdržemi.

$$F_{dyn} = \frac{B}{1,18} [\text{t}] \quad (70)$$

Pro výslednou sílu pneumatických brzd tedy platí:

$$F_{pneu\ brzda} = F_{dyn}x \quad (71)$$

kde x je počet akčních členu (zdrží nebo kotoučových destiček) na vozidle

$$x_{zdrže} = 4n \quad (72)$$

$$x_{disky} = 2n \quad (73)$$

kde n je počet náprav. Podotýkám, že simulace brzdění v tomto případě nepočítá s některými přídatnými vlivy, například doba náběhu brzdy, degradace materiálu a podobně.

4.2.2. Brzdění trakčními motory

Nesymetrie režimu tahu a brzdy tkví pouze ve ztrátách, jejichž "znaménko" se přirozeně nemění. Ztráty se hradí vždy ze strany přívodu energie. Pro trakční aplikace se elektrické brzdění považuje již za samozřejmé, ale za základní provozní režim se považuje motorický chod. To znamená, že při brzdění je výkon na hřídeli přibližně o dvojnásobek ztrát větší než při tahu. To není na závadu, brzdné účinky jsou proto při stejném zatížení motorů (případně dalších zařízení trakčního obvodu) větší. (Danzer, 2004)

Navrhuji proto pro stanovení maximální brzdné síly vyjít ze vzorce 65 s upravenými vlivy ztrát. Tím pádem budeme moci modelovat oba režimy bez dalších přidaných parametrů konfiguračního souboru. Nicméně abychom se více přiblížili realitě, u lokomotiv se stejnosměrným motorem omezíme brzdnou sílu lineárně s klesající rychlostí přibližně od 50 km / h. Vozidlo s rychlostí blížící se zastavení už motoricky není schopno brzdit vůbec kvůli nízkému napětí kotvy.

Pro upravenou účinnost motoru (2násobek ztrát) bude platit:

$$\eta_{motor,brzda} = 2\eta_{motor} - 1 \quad (74)$$

Dále následuje odvození maximální dosažitelné brzdy

$$P_{brzda,max} = \frac{P_n}{\eta_{motor,brzda}\eta_{převodovka}} \quad (75)$$

$$F_{EDB,motor,max} = \min\left(\frac{P_{brzda,max}}{v}, \frac{3,6F_{EDB,50}v}{50}\right) \quad (76)$$

$$F_{EDB,max} = \min\left(G\left(\frac{7500}{3,6v + 44} + 161\right), F_{EDB,motor,max}\right) \quad (77)$$

Kde $F_{EDB,motor,max}$ je brzdná síla daná schopnostmi motoru. Její druhý člen tvoří limitující přímka poklesu účinku EDB od rychlosti 50 km/h níže. $F_{EDB,max}$ je pak celková dosažitelná síla respektující navíc adhezi.

4.3. Elektrické reprezentace

Pro začlenění vozidel do elektrického obvodu je potřeba transformovat soupravy, tedy jednotlivá vozidla na jejich elektrickou reprezentaci. K dispozici máme prvky uvedené v Tab. 1.1.

4.3.1. Model odběrů vlastní spotřeby a tažených vozů

Tato část příkonu souprav by se mohla jevit jako zanedbatelná oproti trakci. Opak je pravdou. Na hnacím vozidle je potřeba živit například kompresor pro brzdící potrubí, dobíječ baterií, řídicí a zabezpečovací elektroniku a zejména nucené chlazení motorů a měničů, případně transformátoru. Pro simulaci by bylo nepřiměřené modelovat každé zařízení zvlášť, je snazší uchýlit se k empirické rovnici, například

$$P_{pp} = kP_{trakce} \quad (78)$$

kde k je poměrná spotřeba pomocných pohonů a uvažuje se přibližně:

$$k_{DC} = 0,02 \quad (79)$$

$$k_{AC} = 0,025 \dots 0,03 \quad (80)$$

To znamená, že pomocné pohony hnacího vozidla tvoří 2 až 3 % odebrané energie. Tato položka je závislá na výkonu trakčního soustrojí v tom kterém režimu vozidla.

Nároky na teplotní komfort cestujících vedou na takřka celoroční provoz vytápění, nebo klimatizace. Příkon jednoho vozu opět stanovujeme empiricky

$$P_{ostatní} = jG \quad (81)$$

kde G je tíha vozu a j je měrná spotřeba pro napájení, jejíž hodnota může nabývat 1 až $7,5 \text{ WN}^{-1}$ (u starších, špatně izolovaných vozů). Stejný vztah bude samozřejmě využit i pro HV, kde nenulový koeficient j bude mít elektrická jednotka. Účinnost této spotřeby sice reálně není vysoká, ale nás z hlediska simulace vlastně nezajímá. I kdybychom ji stanovili, tak ji nemáme při změně podmínek s čím porovnat, neboť bude vždy stejná. (Široký, 2003)

Tento odběr můžeme brát jako lineární zátěž dimenzovanou dle nominálního napětí, takže na aktuálním napětí jsou nezávislé. Jejich modelem bude tedy rezistor s hodnotou:

$$R_{ostatní} = \frac{U_{nominální}^2}{P_{ostatní}} \quad (82)$$

4.3.2. HV vyvíjející tažnou sílu

Při požadavku na transformaci je předán parametr požadované poměrné tažné síly $f_{tažná}$. Protože výslední maximální tažná síla při aktuální rychlosti může být limitována adhezí nebo obecným limitem, je tuto nutné přepočítat na poměrnou dosažitelnou hodnotu z hlediska schopnosti pohonu f_{motor} .

$$F_{max,motor} = \eta_{motor} \eta_{převodovka} \frac{P_n}{v} \quad (83)$$

$$f_{motor} = \frac{f_{tažná} F_{max,tažná}}{F_{max,motor}} \quad (84)$$

Tu přepočítáme na mechanický výkon s využitím znalosti aktuální rychlosti podle vzorce:

$$P_{tah} = f_{motor} F_{max,motor} v \quad (85)$$

Pro příkon pro trakci vozidla bude platit:

$$P_{trakce,tah} = \frac{P_{tah}}{\eta_{motor} \eta_{převodovka} \eta_{regulace} \eta_{trafo}} \quad (86)$$

Všechny účinnosti jsou součástí parametrů vozidla ve vstupních datech. Účinnost transformátoru se uplatňuje pouze při použití AC systému. Modelem hnacího vozidla pod výkonem bude lineární zátěž dimenzovaná na nominální napětí trakčního systému.

$$P_{el,tah} = P_{trakce,tah} + P_{pp} = P_{trakce,tah} (1 + k) \quad (87)$$

$$R_{tah} = \frac{U_n^2}{P_{el,tah}} \quad (88)$$

4.3.3. Brzdící HV bez rekuperace

Při tomto režimu není vrácena žádná energie do napájecí soustavy a je všechna mařena v odporech. Vozidlo musí chladit motory a regulaci (odporníky). Z poměrné brzdné síly $f_{brzdná}$ stanovíme poměrnou brzdnu sílu vzhledem k motoru:

$$F_{EDB,motor,max} = \min\left(\frac{P_{brzda,max}}{v}, \frac{3,6F_{EDB,50v}}{50}\right) \quad (89)$$

$$F_{EDB,max} = \min\left(G\left(\frac{7500}{3,6v + 44} + 161\right), F_{EDB,motor,max}\right) \quad (90)$$

$$f_{EDB} = \frac{f_{brzdná}F_{EDB,max}}{F_{EDB,motor,max}} \quad (91)$$

V tomto případě pak dále bude platit pro skutečný brzdny výkon v motoru:

$$P_{brzda} = f_{EDB}F_{EDB,motor,max}v \quad (92)$$

Pomocné pohony jsou nyní jediným odběrem, transformátorem teče jen mizivý výkon, takže jeho účinnost neuvažujeme.

$$P_{el,brzda} = P_{pp,brzda} = kP_{brzda}\eta_{motor,brzda}\eta_{převodovka}\eta_{regulace} \quad (93)$$

$$R_{el,brzda} = \frac{U_n^2}{P_{el,brzda}} \quad (94)$$

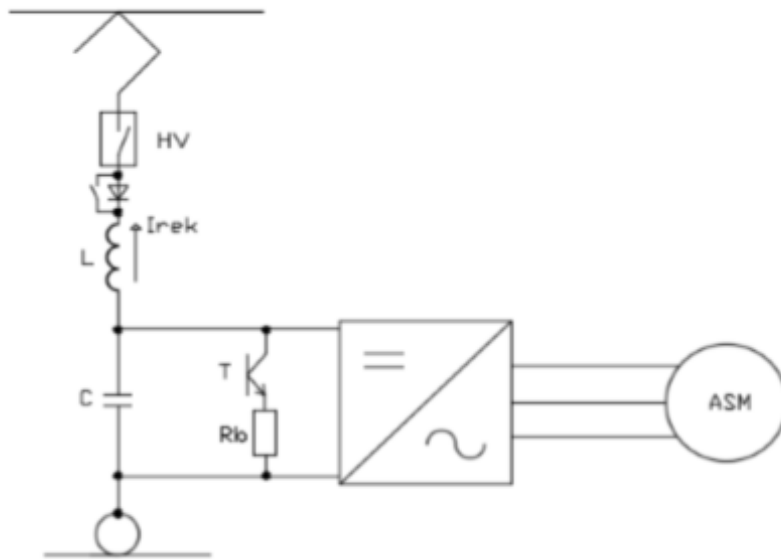
4.3.4. Rekuperující HV

Během rekuperačního brzdění dochází u nových vozidel při brzdění stejnosměrného meziobvodu vozidla, ze kterého dochází k napájení pomocných spotřeb. Podle velikosti napětí v troleji lokomotiva dodává úměrně velikost proudu, aby byla splněna podmínka konstantního výkonu. Zároveň však nesmí být překročeno maximální dovolené napětí v troleji. V případě, že by nebyla energie jinou soupravou odebírána, maří se v brzdovém odporu. (Bošek, 2016)

Výpočet je ve většině kroků stejný s předchozí kapitolou, liší se až ve výpočtu elektrického příkonu. Ten nyní bude mít fyzikálně význam výkonu.

$$P_{trakce} = P_{brzda} \eta_{motor,brzda} \eta_{převodovka} \eta_{regulace} \eta_{trafo} \quad (95)$$

$$P_{el,reku} = P_{trakce} - P_{pp} = P_{trakce} (1 - k) \quad (96)$$

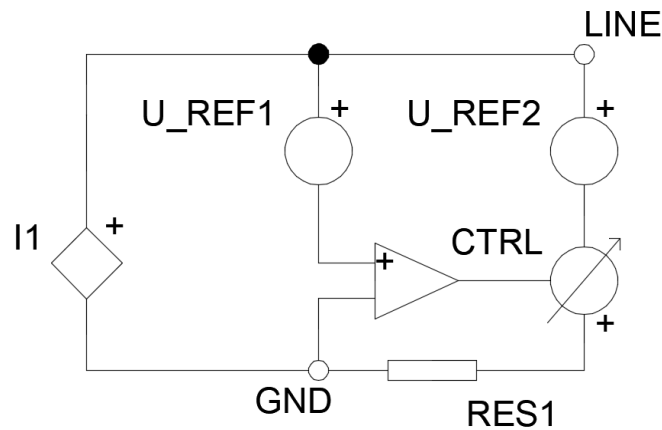


Obr. 4.1 Blokové schéma moderního vozidla s možností rekuperace (Bošek, 2016)

Pro korektní simulaci chování jsem navrhl schéma zdroje konstantního výkonu (Obr. 4.2). Zde je popis jednotlivých součástí:

- U_REF1, U_REF2: referenční zdroje s hodnotou minimálního napětí soustavy (U_{min}),
- I1: proudový zdroj o hodnotě $\frac{P_{el,reku}}{U_{min}}$,
- CTRL: napětím řízený napěťový zdroj se ziskem $\frac{U_{min}}{(U_{max} - U_{min})}$,
- RES1: brzdový rezistor pro maření přebytečné energie s odporem $\frac{U_{min} U_{max}}{P_{el,reku}}$

Tento obvod vykazuje požadované vlastnosti včetně dodržení horního napěťového limitu. Ve schématu je zaznačena polarita, nicméně tím, že nejsou využity polovodičové, nýbrž ideální součástky, funguje i pro střídavou trakci.



Obr. 4.2 Schéma rekuperující lokomotivy pro simulaci

4.3.5. Ztráty

Jedná se o ztráty vznikající (podél toku výkonu) mezi sběračem a nápravou. Ztráty v motoru dělíme na ztráty ohmické ve vinutích, ztráty v železe a mechanické ztráty v ložiscích. Obecně jsou tyto hodnoty závislé na napětí, proudu do kotvy, mechanických otáčkách, frekvenci a dalších vlivech daných konstrukcí.

- Ztráty v ustáleném stavu jsou tvořeny ztrátami ve vinutí (35..60 % celkových ztrát) a jsou úměrné kvadrátu proudu.
- Ztráty budící u stejnosměrných cize buzených a synchronních strojů se považují za konstantní s velikostí 6...15 % celkových ztrát.
- Celkové ztráty v magnetickém obvodu elektrických strojů se skládají z části vyvolané vířivými proudy a ztrát hysterezních.
- Mechanické ztráty vyvolané třením jsou úměrné rychlosti, ventilační přibližně její třetí mocnině.
- V proudových obvodech měničů jsou ztráty úměrné kvadrátu proudu, v polovodičových součástkách jsou dány prahovým napětím a diferenciálním odporem. (Javůrek, 2003)

Vzhledem ke koncepci výpočtů pomocí účinností jednotlivých zařízení máme výpočet ztrát velmi jednoduchý při všech stavech kromě rekuperace, kde se projeví i maření v odporu.

$$P_{ztráty} = |P_{mech} - P_{trakce}| \quad (97)$$

$$P_{ztráty, reku} = |P_{mech} - P_{trakce}| + \frac{U - U_{min}}{U_{max} - U_{min}} P_{el, reku} \quad (98)$$

5. Elektrický model stacionárních zařízení dopravní cesty

Pro modely platí v zásadě stejná pravidla jako v kapitole 4.3. Narozdíl od vozidel se však dopravní cesta podílí také na podélných složkách obvodu.

5.1.1. Podélné impedance

Ty představují vliv vedení a zpětné kolejové cesty mezi dvěma sousedními příčnými zařízeními. Jeho velikost je dána vztahem:

$$\hat{Z}_{podélná} = \frac{\hat{z}\Delta l}{1000} [\Omega, \Omega/\text{km}, \text{m}] \quad (99)$$

$$\hat{z} = \hat{z}_{napájecí\ soustava} + \hat{z}_{zpětná\ cesta} [\Omega/\text{km}] \quad (100)$$

kde \hat{z} je měrná impedance napájecího obvodu. Její hodnota je součástí konfiguračních dat traťového úseku. Sestava trolejového vedení pro soustavu DC 3 kV obsahuje trolejový drát 150 mm² a nosné lano měděné 100 mm². Mezi nosným lanem a trolejovým drátem se umísťují vodivé spojky tvořené také měděnými lany.

$$\hat{z}_{napájecí\ soustava} = 0,06 \dots 0,09 [\Omega/\text{km}] \quad (101)$$

U jednofázové soustavy AC 25 kV, 50 Hz se používá trolejový drát o průřezu 80 mm² a nosné lano bronzové.

$$\hat{z}_{napájecí\ soustava} = 0,26 + j0,45 [\Omega/\text{km}] \quad (102)$$

Všechny údaje jsou přejaty ze skript Napájení elektrických drah (Doleček, 2012). Ohmický měrný odpor zpětné kolejové cesty (ρ) lze stanovit z Tab. 5.1.

		<i>T</i>	<i>R65</i>	<i>A</i>
		ρ [Ω/km]		
Bezstyková	jednokolejná	0,0132	0,0101	0,0148
	dvoukolejná	0,0066	0,0050	0,0074
S kolejnicovými styky	jednokolejná	0,0145	0,0112	0,0166
	dvoukolejná	0,0075	0,0056	0,0080

Tab. 5.1 Měrná vodivost kolejové zpětné cesty (Doleček, 2012)

5.1.2. Měničrna

Jde o napájecí stanici na stejnosměrném systému, jejímiž klíčovými částmi jsou transformátory a 12pulsní usměrňovač diodového typu. Ostatní výkonové prvky nejsou vzhledem ke specifikaci zadání podstatné. Z hlediska obvodu jde nepochybně o tvrdý zdroj napětí. Avšak z přítomnosti polovodičových prvků je zřejmé, že výstupní charakteristika nebude lineární.

$$U = U_0 - U_D - U_m \quad (103)$$

Při převaze toku výkonu z distribuční sítě do troleje budou sice její tvar ovlivňovat úbytky napětí na transformátorech a kabelových vedeních U_m , nicméně pokud napětí v troleji přesáhne nominální hodnotu měničrny, usměrňovač se uzavírá a nepropouští prakticky žádný proud zpět. V této části je vlastně zdroj napětíově velice měkký. Popsané chování navrhuji simulovat pomocí Shockleyho modelu diody.

$$I = I_S \left(e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1 \right) \quad (104)$$

Rovnice 104 uvádí základní vztah mezi procházejícím proudem I a napětím p-n přechodu U_D . I_S je saturační proud

$$I_S \cong 10^{-12} \text{ A} \quad (105)$$

U_T je tepelné napětí

$$U_T = \frac{kT}{q} \cong 25,85 \text{ mV} \quad (106)$$

kde k je Boltzmannova konstanta, T je absolutní teplota a q je elementární náboj. Dále se v původním vzorci nachází n , což je materiálová bezrozměrná konstanta (pro křemíkové diody mezi 1 a 2). Úpravami na žádaný tvar získáme tento výraz

$$U_D = 10^{-12} \ln\left(\frac{I}{I_S} + 1\right) V \quad (107)$$

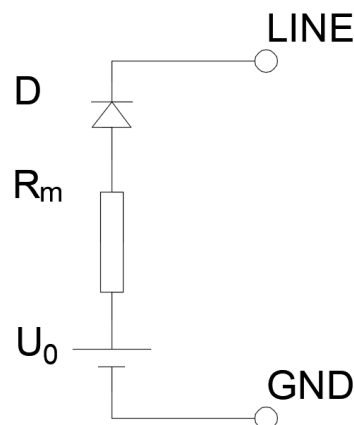
Vztah pro stanovení úbytků napětí na transformátorech a v distribuční síti získáme syntézou rovnic 34 a 35:

$$U_m = \frac{U_0}{I_n} A \left(\frac{u_k}{100n} + \frac{S_n}{S_k} \right) I \quad (108)$$

kde I_n je jmenovitý proud usměrňovací jednotky (A), u_k je poměrné napětí usměrňovačového transformátoru na krátko (%), n je počet paralelně pracujících jednotek, S_n je jmenovitý a S_k zkratový výkon na primární straně transformátoru (VA). (Trávníček, 1988)

Ztráty na diodě budou v obou polorovinách charakteristiky zanedbatelné.

$$P_{ztráta} = U_m I \quad (109)$$



Obr. 5.1 Schéma měřírny pro simulaci

5.1.3. Trakční transformovna

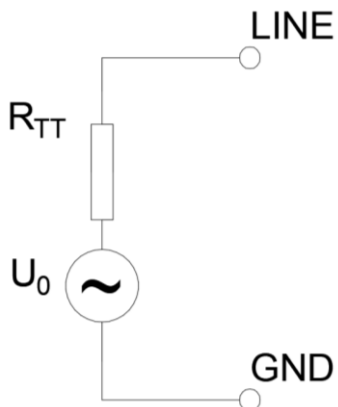
Trakční napájecí stanice na střídavých systémech obvykle sestává z transformátorů a FKZ. Napětí na trakčních sběrnicích je výsledkem rozdílu mezi napětím naprázdno a úbytkem napětí v energetické přívodní lince a na trakčním transformátoru:

$$\hat{U} = \hat{U}_0 - \hat{U}_{TT} \quad (110)$$

kde pro výpočet \hat{U}_{TT} použijeme vztah 37. Úbytek napětí je závislý na hodnotě zatížení i na jeho účinníku. Komplexní ztrátový výkon je dán vztahem

$$\hat{S}_{ztráta} = \hat{U}_{TT} \bar{I} \quad (111)$$

FKZ z hlediska naší simulace nemá vliv. Filtruje harmonické složky (3. a 5.), které nejsou ve výpočtech zohledňovány, a dále kompenzuje účinník vzhledem k distribuční síti (k napájecímu obvodu je připojena *paralelně* v místě napěťové sběrnice).



Obr. 5.2 Schéma trakční transformovny pro simulaci

6. Implementace

Implementace je v jazyce C# 7.1 a využívá platformu .NET framework 4.7. Program je strukturovan dle zásad objektového programování, intenzivně využívá také genericitu, funkcionalistické lambdy, paralelní algoritmy a asynchronní metody.

6.1. Architektura

Základní komponentou je třída `MainForm`, která je automaticky při začátku běhu instanciována a zajišťuje obsluhu grafického rozhraní. Prostřednictvím třídy `MainResource` spravuje všechna klíčová data. Údaje o trati jsou reprezentována rozhraním `IElectrifiedLineSection`, dále všechny lokomotivy (`TractionUnit`) a vozy (`Wagon`). Z vozidel uživatel skládá soupravy typu `Train` a stanoví pro ně jízdni řády jež představují objekty rozhraní `IElectricTrainManager`. Poslední instancí ve smyslu programovacího jazyka i časové posloupnosti je rozhraní obstarávající simulaci – `IElectrifiedLineSectionSimulator`.

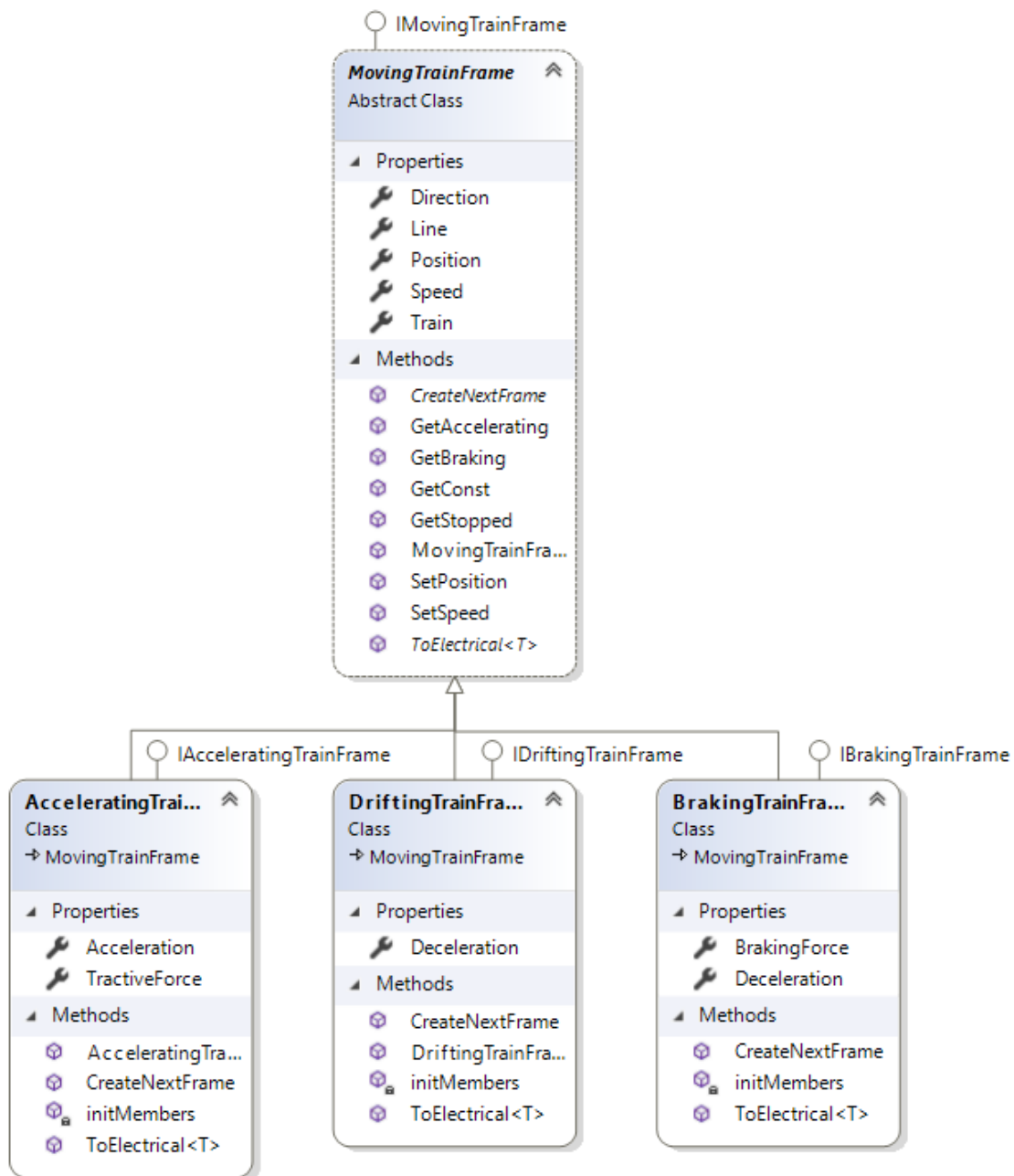
Třída `MainForm` tak zejména reaguje na uživatelské příkazy. Sama zajišťuje načítání dat tratí a vozidel a tvorbu souprav. Na tvorbu jízdni řádů a exekuci simulace předává kontrolu nejprve jednotlivým objektům typu `ElectricTrainManager`, a když jsou dokončeny a uživatel spustí simulaci. Je vytvořena instance `ElectrifiedLineSectionSimulator`.

6.2. Jízda vlaku

Z kapitoly 3.3 vyplynulo, že jsou řešeny 3 typy chování vlaku (konstantní jízda, zrychlování a brzdění). Jelikož vlak jedoucí konstantní rychlostí nemá jednoznačný způsob řízení, je ve skutečnosti řízen jako zrychlující nebo brzdící podle aktuálních odporů. Pouze v případě, že jsou odpory nulové nebo vlak stojí, můžeme říci, že jede bez výkonu – výběhem. Z této úvahy plyne diagram tříd implementujících časové snímky vlaku. Třídy mají každá své rozhraní, aby byly nahraditelné pro případ větší úpravy, ale všechny splňují kontrakt daný rozhraním `IMovingTrainFrame`. Díky němu lze zjišťovat aktuální stav (pozici, rychlost, ...) a volat funkce pro výpočet nového snímku.

Sestavu tachogramu si řídí instance třídy `IElectricTrainManager` prostřednictvím třídy `SpeedDiagram` podle algoritmu popsaného v kapitole 3.3. Pro výpočet následujícího kroku se volá nad snímkem funkce `CreateNextFrame` (vytvoří snímek stejného typu) až do chvíle, kdy je potřeba změnit chování vlaku. Pak jednou zavolá funkci `GetBraking`, `GetAccelerating`, `GetStopped`, nebo `GetConst` a získá snímek s novým chováním, ve kterém opět může pokračovat, nebo ho dle potřeby změnit.

Všechny třídy implementují funkci, která pomocí dynamické vazby vrací instanci rozhraní `IElectrical`, jež je zpracována v třídě reprezentující vlak jako elektrické zařízení `ElectricTrainFrame`.

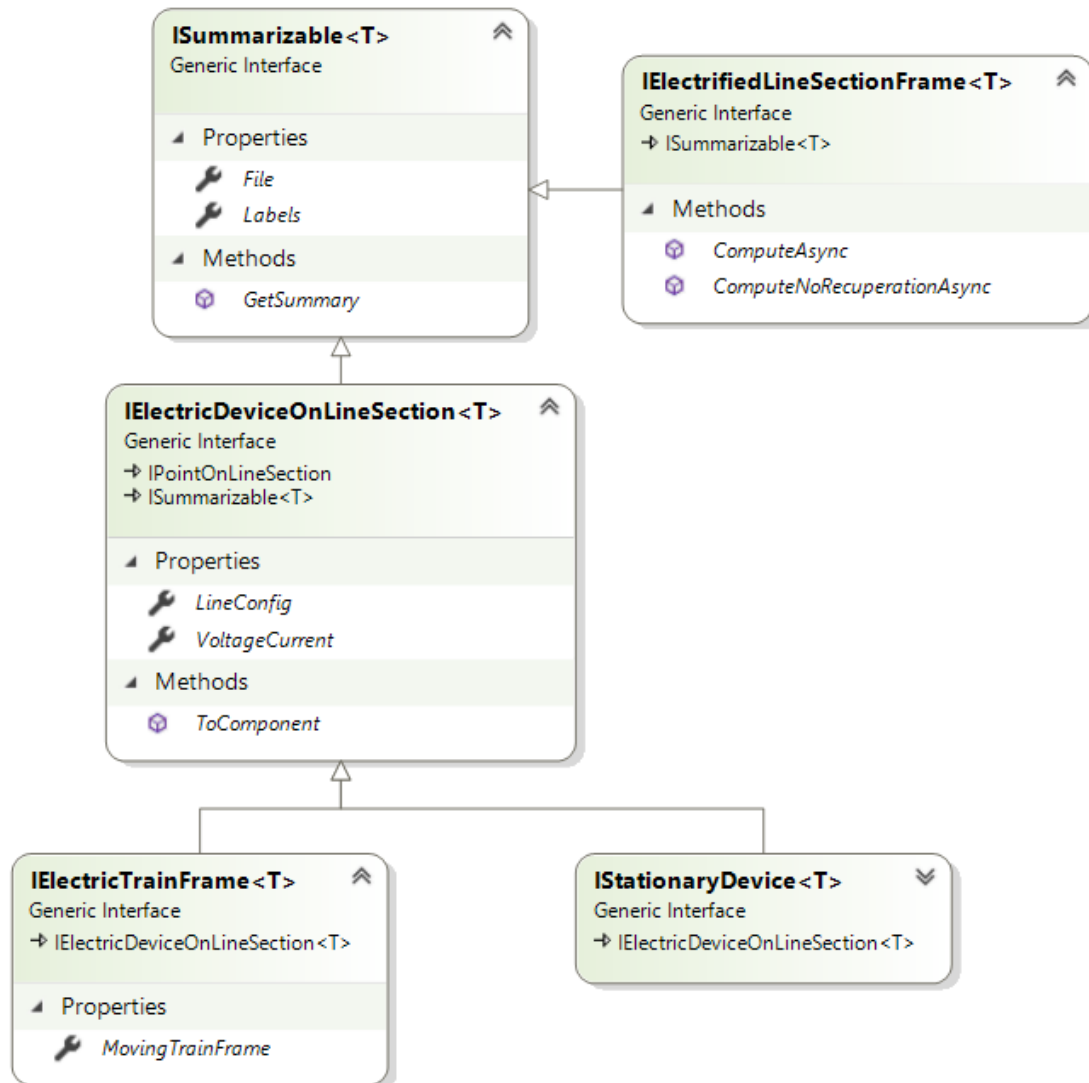


Obr. 6.1 UML diagram tříd představujících snímek vlaku

6.3. Řešení elektrického obvodu

Kontrolu přebírá objekt `ElectrifiedLineSectionSimulator` a vezme v každou simulační vteřinu patřičné snímky vlaků typu `ElectricTrainFrame`, jež jsou potomky rozhraní `IElectricDeviceOnLineSection`. Toto rozhraní implementují i stacionární zařízení dopravní cesty, a když se dají všechny potřebné instance dohromady, vznikne instance třídy `ElectrifiedLineSectionFrame`, tedy časový snímek elektrifikovaného

úseku. Rozhraní `IElectrical` zapouzdřuje elektrickou transformaci aktuálního stavu zařízení a nabízí ho funkcí `ToComponent` jako komponentu, nebo-li model stravitelný knihovnou `SpiceSharp`.



Obr. 6.2 UML diagram rozhraní zpracovávaných při řešení elektrického obvodu

Tvorba těchto komponent je popsána v kapitole . Zde bych pouze uvedl poznámku, že aktuální verze knihovny obsahuje chybu v kódu induktoru. Kapacitory se v modelu nikde nenachází, takže ji nahrazuji zápornou hodnotou kapacity, což je fyzikální nesmysl, ale pro naše použití, kdy je frekvence konstantní, jde o matematicky ekvivalentní řešení. V příští verzi knihovny by toto mělo být opraveno.

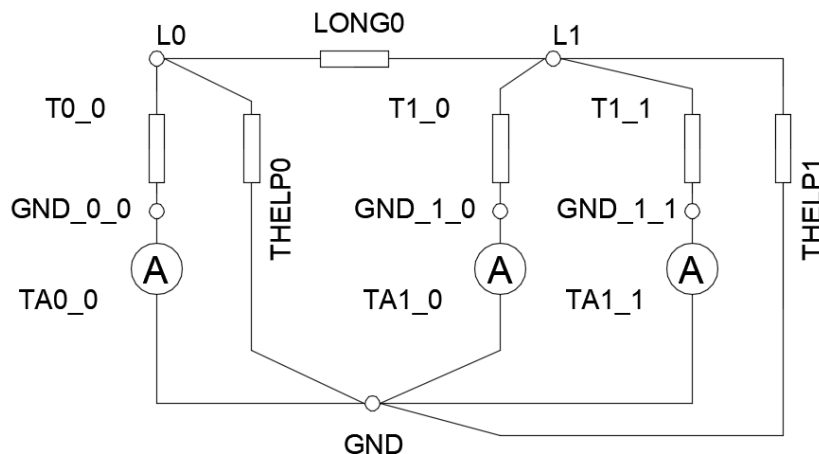
$$\Im(\hat{Z}) = X_L - X_C = L\omega - \frac{1}{C\omega} \quad (112)$$

$$L\omega = -\frac{1}{C\omega} \quad (113)$$

$$C = -\frac{1}{L\omega^2} \quad (114)$$

Všechny komponenty zapojují do obvodu dle Obr. 3.2. Příčné komponenty pojmenovávám jako „Tindex_subIndex“, kde *index* je číslo příčné větve a *subIndex* je číslo paralelního prvku v této větvi pro případ, kdy jsou 2 zařízení na stejné pozici v úseku. Například 2 vlaky ve stanici, nebo vlak v místě připojení TNS. Za účelem měření proudů v obvodu jsou do příčných větví ještě přidány napěťové zdroje s nulovou amplitudou, pojmenované „TAindex_subIndex“.

Protože knihovna při tak velkém počtu zdrojů vyhodnocovala některé uzly jako plovoucí nebo zdroje jako nezátížené, vkládají se paralelně ke každé příčné větvi ještě pomocné rezistory „THELPindex“ s hodnotou 1 MΩ i kvůli případu, kdy by se v úseku pohyboval pouze rekuperující vlak.



Obr. 6.3 Topologie obvodu pro SpiceSharp

Typ simulace závisí na napájecím systému. V případě DC je aplikováno hledání pracovního bodu, v případě AC je volána frekvenční analýza s konstantním nominálním kmitočtem. Napětí jednotlivých uzlů vůči GND se pak po simulaci získává buď jako fázor v komplexním tvaru, nebo jako reálná hodnota. Proudů příčných zařízení obdobně, ale proudy podélnými větvemi je potřeba dopočítat pomocí Kirchhoffova zákona. V případě Obr. 6.3 bude platit (se zanedbáním pomocných odporů):

$$I_{LONG0} = I_{TA0_0} \quad (115)$$

A takto dále odvodíme, že každý další podélný proud je sumou všech dosavadních příčných proudů. Všechny získané hodnoty jsou během simulace následujícího snímku přiřazený k odpovídajícím zařízením a je vypočtena výkonová bilance. Poté je celé shrnutí snímku zapsáno do výstupních souborů (kap. 7.3).

6.4. Externí knihovny

Zde jsou uvedeny podrobnosti o využitých knihovnách, které nejsou součástí .NET.

6.4.1. SpiceSharp

Simulátor elektrických obvodů napsaný v C#, který nabízí AC, DC a tranzientní simulace. Vychází z originálu Berkeley Spice s některými úpravami pro integraci do .NET prostředí. Je využit pro modelování a řešení elektrického obvodu.

- Verze: 1.1.0
- Licence: MIT
- Autor: Sven Boulanger
- <https://github.com/svenboulanger/SpiceSharp/>

6.4.2. Generic.Math

Jednoduchá knihovna založená na původní knihovně MiscUtil využívající Expression API pro generování matematických a konverzních operací v závislosti na generickém typu.

- Verze: 1.0.2
- Licence: MIT, licence k MiscUtil je uvedena jako Příloha B
- Autoři: HelloKitty, Jon Skeet a Marc Gravell
- <https://github.com/HelloKitty/Generic.Math>

6.4.3. Mathnet.Numerics

Univerzální knihovna pro numerické výpočty zahrnující speciální funkce, lineární algebru, pravděpodobnost, náhodná čísla, interpolace, numerické integrování, regresi, optimalizaci a další. Původně použita pro výpočty s maticemi v rámci řešení smyčkových proudů. Nyní jako nedílná součást knihovny SpiceSharp.

- Verze: 3.20.0

- Licence: MIT/X11
- Autoři: Christoph Ruedg, Marcus Cuda, Jurgen Van Gael
- <https://numerics.mathdotnet.com/>

7. Grafické rozhraní a obsluha programu

Celý program je lokalizován v češtině s výjimkou některých potenciálních chybových hlášení. Grafická nadstavba je vytvořena za využití technologie Windows Forms. Na hlavním panelu je zobrazena vždy jedna ze 6 možných karet. Karty tak rozdělují řízení na 6 logických celků, které se postupně zpřístupňují.

7.1. Vstupní data a načítání ze souborů

Parametry traťového úseku a vozidel jsou načítána z CSV souborů, které tvoří záhlaví v prvním řádku a jeden nebo více řádků dat dle charakteru informací. Příslušné karty obsahují v nabídce Soubor možnost „načíst“. Výběrem možnosti se zobrazí dialogové okno pro výběr složky, ve které jsou dané soubory uloženy. Soubory musí být pojmenovány takovými názvy, které jsou uvedeny níže. Ve zbytku plochy jsou pak vizualizovány vybrané načtené údaje. Tato data nelze editovat.

7.1.1. Vstupní data tratě

Jsou rozdělena do 3 souborů. První z nich se musí jmenovat „trat.csv“ a obsahuje mechanickou stránku dopravní cesty a má následující sloupce:

- poloha: číselný údaj představující počáteční pozici řádku v metrech,
- stoupání: číselný údaj představující sklon v promile,
- zastávka: řetězec se jménem stanice / zastávky, pokud je prázdný, daný řádek neobsahuje bod zastavení,
- poloměr: číselný údaj vyjadřující poloměr oblouku, řádek bez oblouku není vyjádřen nekonečnem, nýbrž nulou,
- počet kolejí: celočíselný bezznaménkový údaj sloužící pro výpočet odporu v tunelu a pro stanovení impedance napájecí soustavy mezi dvěma body,
- rychlost: bezznaménkový číselný údaj vyjadřující traťovou rychlost v km/h,
- tunel: logický (binární) stav přítomnosti tunelu na daném řádku (možné hodnoty jsou *true* a *false*).

Soubor je načítán po řadcích a hodnoty platí pro oba směry a všechny traťové koleje. Vzdálenost počátečních poloh řádků není nijak omezena, jejich rozdíl vyjadřuje délku úseku

s konstantními parametry (například část oblouku, kde nedochází ke změně sklonu a traťové rychlosti). Zastávka / stanice je vždy uvedena pouze na jednom řádku a každá má unikátní název.

Druhý soubor „elektro.csv“ nese informace o parametrech napájecího systému, obsahuje tedy:

- maxNapeti: maximální hodnotu napětí využívanou při rekuperaci (V),
- tnsNapeti: jmenovitou hodnotu napětí napájecích stanic (V),
- nomNapeti: nominální napětí systému (V),
- minNapeti: spodní limit napětí v nejméně příznivém bodě připojení (V),
- frekvence: jmenovitá frekvence (Hz),
- mernyOdpor: měrný odpor napájecí soustavy a zpětné kolejové cesty (Ω/km),
- mernaReaktance: měrná hodnota reaktance vlivem indukčnosti (Ω/km)

Hodnota frekvence rozhoduje o typu systému, a tudíž o vnitřní reprezentaci všech elektrických hodnot a prováděných výpočtů simulace. Pro střídavý způsob napájení je simulace řešena pomocí symbolického fázorového zápisu. Je-li frekvence nulová, soubor nemusí obsahovat položku reaktance a veškeré další výpočty jsou řešeny v oboru reálných čísel. Soubor musí obsahovat pouze jeden řádek pod záhlavím.

Třetí soubor „tns.csv“ obsahuje informace o detailech jednotlivých napájecích stanic. Každá stanice je uvedena zvlášť na řádku a jejich počet není omezen. Pokud byl detekován střídavý systém, pak soubor musí obsahovat sloupce:

- poloha: umístění v rámci úseku (m),
- Sn: jmenovitý zdánlivý výkon trakčního transformátoru (VA),
- Sk: zkratový zdánlivý výkon na primáru trakčního transformátoru (VA),
- uk: poměrné napětí na krátko (%)

Pakliže se jedná o DC systém, jsou modelovány měničárny a ty vyžadují navíc tato pole:

- A: koeficient strmosti ztrát usměrňovače (-),
- usmernovace: počet paralelně pracujících usměrňovacích jednotek,
- Iusm: jmenovitý proud usměrňovače.

Bližší informace k využívaným parametrům jsou uvedeny v kapitole 5. Po korektním načtení dopravní cesty je uživateli umožněn vstup na kartu týkající se vozidel.

7.1.2. Vstupní data vozidel

Vstupní data se načítají stejným způsobem jako v případě tratě. Jsou rozdělena mezi 2 soubory „loko.csv“ a „vozy.csv“. Vozy mají tyto kolonky:

- *nazev*: název, který bude zobrazován v GUI,
- *hmotnost*: (kg),
- *maxRychlost*: (km/h),
- *delka*: fyzická délka vozidla (m),
- *pocetNaprav*,
- *a*: koeficient „a“ odporového polynomu vozidla,
- *b*: koeficient „b“ odporového polynomu,
- *c*: koeficient „c“ odporového polynomu,
- *brzdnaVaha*: brzdná hmotnost vztahující se k pneumatické brzdě (t),
- *brzdy*: typ brzd, kde jsou možné pouze tyto možnosti:
 - *discBrakes*, *brakeBlocksBg* a *brakeBlocksBgu*,
- *ro*: součinitel rotačních hmot,
- *j*: součinitel ostatních elektrických spotřeb (W/N).

Hnací vozidla obsahují všechny kolonky jako vozy a k nim tyto další:

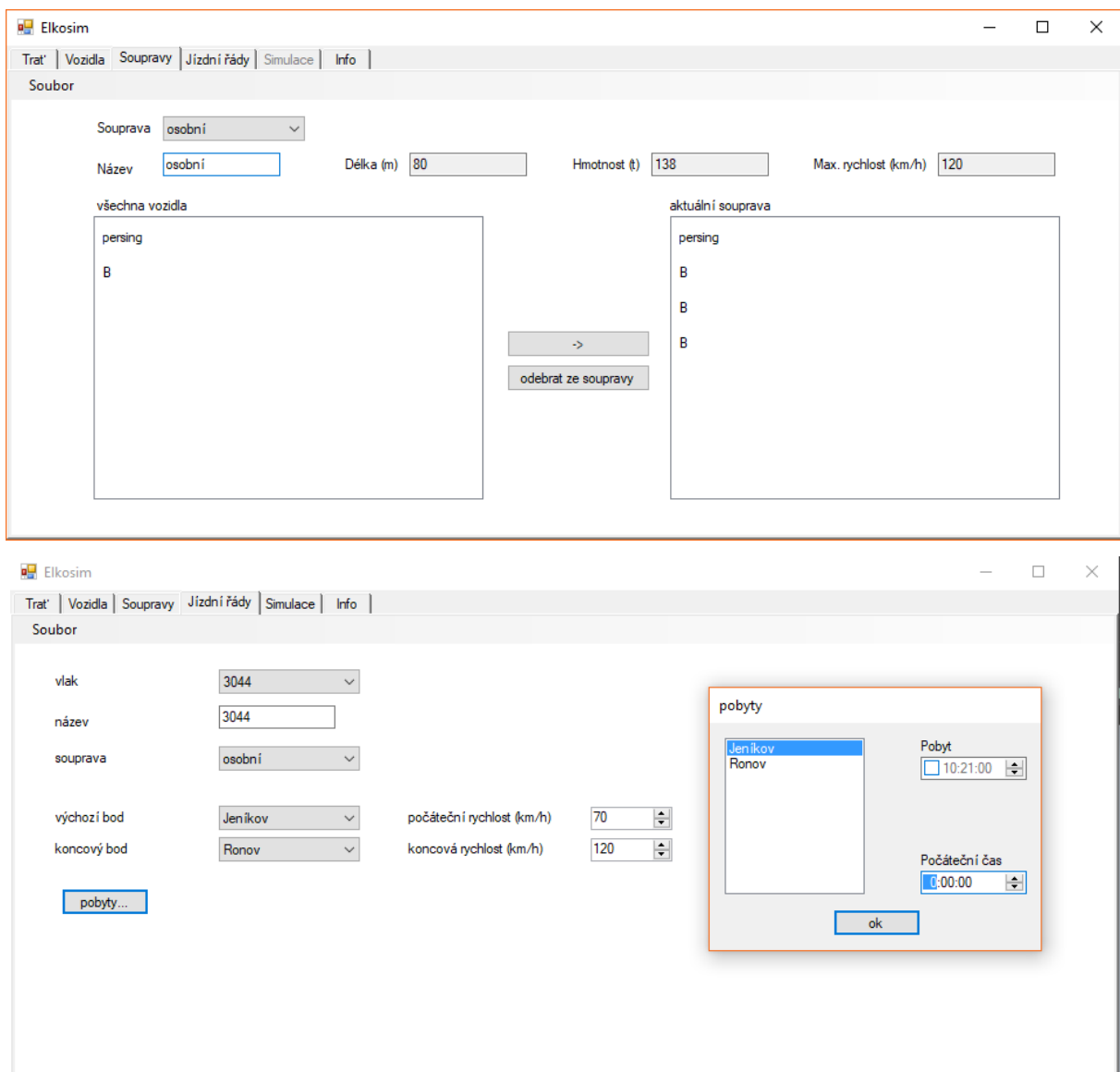
- *vykon*: maximální mechanický výkon vozidla (W),
- *maxSila*: maximální povolená trakční síla (N),
- *ucinnostMotor*: účinnost všech motorů,
- *ucinnostPrevodovka*: účinnost všech převodových ústrojí,
- *ucinnostRegulace*: účinnost regulačního zařízení,
- *ucinnostTrafo*: účinnost transformátoru,
- *rekuperuje*: logická proměnná, možné hodnoty jsou *true* a *false*
- *k*: součinitel spotřeby pomocných pohonů.

Pokud vozidlo nemá transformátor, jako účinnost se uvede 1. Pokud je vozidlo simulováno na stejnosměrné trakci, tento parametr je také automaticky nastaven na 1.

Po načtení vozidel je znemožněno opětovné načítání parametrů dopravní cesty a naopak je umožněna správa souprav.

7.2. Tvorba souprav a jízdního řádu

Na kartě Soupravy uživatel přidává nebo odebírá vozidla do jednotlivých souprav. Řazení je závislé na časové posloupnosti vkládání vozidel. V obou seznamech lze vybrat více položek a urychlit tak editaci. Je důležité, aby uživatel správně nastavil a pojmenoval všechny soupravy, při vstupu na kartu Jízdní řády je jejich stav zafixován a editace už není možná.



Obr. 7.1 Ukázka grafického rozhraní pro správu souprav a jízdních řádů

Při tvorbě jízdních řádů je potřeba nastavit všechny parametry pro správný průběh simulace. Název může být libovolný textový řetězec, pro výchozí a koncový bod jsou dostupné všechny zastávky a poloha počátku a konce úseku. U nastavení okrajových rychlostí je potřeba dát pozor na schopnost dobrzdění soupravy k nejbližšímu bodu snížení rychlosti nebo pobytu.

Tlačítkem „pobyty“ se dostane uživatel do dialogového okna nastavení pobytů v zastávkách / stanicích a času vstupu do úseku. Zastávky jsou řazeny dle zvoleného směru jízdy. Pro dodržení pobytu musí být zaškrtnuto políčko u výběru času. Po potvrzení dialogu jsou sestaveny tachogramy celé jízdy a případné překročení limitů (vlak by nestihl ujet trasu do půlnoci nebo je zvolena vysoká počáteční rychlost) je oznámeno chybovou hláškou. Opětovné otevření tohoto okna resetuje nastavení pobytů.

7.3. Simulace a výstupní data

Na kartě Simulace je možnost nastavení adresáře pro výstupní data a tlačítko pro spuštění. Simulovány jsou pouze okamžiky, kdy je v úseku alespoň jeden vlak, ostatní nemají z hlediska zadání žádný význam, takže jsou vynechány. Délka výpočtu simulace záleží na počtu vozidel a výkonu počítače. Na stavovém řádku karty je dynamický ukazatel stádia výpočtu.

Za běhu jsou asynchronně ukládána vypočtená data do CSV souborů ve zvoleném adresáři podle klíče popsaného níže. Na prvním řádku jsou uvedeny popisky sloupců, všechny ostatní řádky představují hodnoty a mají časový odstup odpovídající kroku simulace, tedy 1 vteřiny. Vynechaným časovým údajům odpovídá vysvětlení z předchozího odstavce.

7.3.1. Informace o vlacích

Soubory jsou pojmenovány podle názvů vlaků na kartě Jízdní řády, každý vlak má tedy svůj soubor. Obsahují tyto sloupce:

- cas: čas v rámci 24 hodin GVD,
- pozice: umístění soupravy v úseku (m),
- napeti: napětí na sběrači (V),
- proud: proud procházející sběračem (A), znaménko respektuje Obr. 3.2,
- ztraty: výkonové ztráty v soupravě (W),

- vlastníSpotr: fixní spotřeba nezávislá na stavu trakčního soustrojí,
- příkon: celkový elektrický příkon (W)

Formát čísel respektuje vnitřní reprezentaci, takže při střídavém napájení jsou všechny elektrické veličiny uvedeny v komplexním tvaru.

7.3.2. Informace o napájecí soustavě

Jsou rozloženy mezi soubory jednotlivých trakčních napájecích stanic a jeden soubor shrnující ztráty ve vedení. Napájecí stanice mají své soubory pojmenovány jako „TNS_ x “, kde x je pozice dané TNS dle vstupního konfiguračního souboru. Tyto soubory neobsahují žádné sloupce navíc oproti souborům týkajících se vlaků, pro vysvětlení jejich významu tedy platí seznam uvedený v předchozí kapitole. Ztráty v napájecí soustavě jsou sumou ztrát všech podélných impedancí (kap. 5.1.1).

8. Závěr

Byl vytvořen program dle zadání a vytyčených cílů. Umožňuje simulovat takřka libovolnou provozní situaci na elektrifikovaném useku železniční tratě. Je podle mne dostatečně parametrizovatelný a Především jsem rád, že se podařilo splnit velkou univerzálnost byť za cenu kompromisů ve věrnosti simulace. Ačkoliv je program uvnitř poměrně komplexní, snažil jsem se jeho obsluhu a konfiguraci udělat intuitivní. Grafické rozhraní je sice poněkud spartánské, nicméně vzhled není hlavní doménou simulátoru. Lze očekávat, že při takto rozsáhlém systému se budou vyskytovat chyby a ne všechny chybové hlášky budou zcela srozumitelné. Uživatele v takové situaci prosím o shovívavost.

Domnívám se, že jsem zvolil velmi dobře jazyk a vývojové prostředí. Důsledné dodržování principů segregace abstrakčních vrstev mi umožnil nedlouho před odevzdáním práce zcela vyměnit jedno výpočetní jádro a program tak zásadním způsobem zlepšit. Jednoznačně by bylo možné dále zlepšovat. Velmi vhodná by byla například možnost uložení konfigurace souprav a jízdnicích řádů pro snadnou opakovanou simulaci i po opuštění programu. Také možnost volby formátu vstupních a výstupních dat by nejspíš umožnila lepší návaznost na další nástroje.

Přál bych si, aby si simulátor našel své místo při analýzách nebo výuce předmětů týkajících se napájení, trakce a energetiky. Nicméně až čas ukáže, nakolik je spolehlivý a kde jsou jeho slabiny.

Příloha A Obsah vloženého CD

- Soubory zdrojového kódu programu.
- Demonstrativní soubory vstupních a výstupních dat.
- Binární spustitelná verze simulátoru.
- Elektronická podoba tohoto dokumentu.

Příloha B Licence knihovny Miscellaneous Utility Library

"Miscellaneous Utility Library" Software Licence

Version 1.0. Copyright (c) 2004-2008 Jon Skeet and Marc Gravell. All rights reserved.

Redistribution and use in source and binary forms, with or without modification, are permitted provided that the following conditions are met:

1. Redistributions of source code must retain the above copyright notice, this list of conditions and the following disclaimer.

2. Redistributions in binary form must reproduce the above copyright notice, this list of conditions and the following disclaimer in the documentation and/or other materials provided with the distribution.

3. The end-user documentation included with the redistribution, if any, must include the following acknowledgment: "This product includes software developed by Jon Skeet and Marc Gravell. Contact skeet@pobox.com, or see <http://www.pobox.com/~skeet/>." Alternately, this acknowledgment may appear in the software itself, if and wherever such third-party acknowledgments normally appear.

4. The name "Miscellaneous Utility Library" must not be used to endorse or promote products derived from this software without prior written permission. For written permission, please contact skeet@pobox.com.

5. Products derived from this software may not be called "Miscellaneous Utility Library", nor may "Miscellaneous Utility Library" appear in their name, without prior written permission of Jon Skeet.

THIS SOFTWARE IS PROVIDED "AS IS" AND ANY EXPRESSED OR IMPLIED WARRANTIES, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, THE IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE DISCLAIMED. IN NO EVENT SHALL JON SKEET BE LIABLE FOR ANY DIRECT, INDIRECT, INCIDENTAL, SPECIAL, EXEMPLARY, OR CONSEQUENTIAL DAMAGES (INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, PROCUREMENT OF SUBSTITUTE GOODS OR SERVICES; LOSS OF USE, DATA, OR PROFITS; OR BUSINESS

INTERRUPTION) HOWEVER CAUSED AND ON ANY THEORY OF LIABILITY, WHETHER IN CONTRACT, STRICT LIABILITY, OR TORT (INCLUDING NEGLIGENCE OR OTHERWISE) ARISING IN ANY WAY OUT OF THE USE OF THIS SOFTWARE, EVEN IF ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGE.

Seznam obrázků

Obr. 1.1 Rozklad tíhy drážního vozidla ve sklonu (Mlynařík, 2011)	12
Obr. 1.2 Náhradní schéma sériového motoru v ustáleném stavu (Danzer, 2006)	15
Obr. 1.3 Úplná trakční charakteristika lokomotivní řady E 499.2 (Široký, 2003)	16
Obr. 1.4 Zjednodušené schéma odporové regulace (Danzer, 2006)	17
Obr. 1.5 Ztráty v rozjezdových odporech při skupinovém řazení motorů (Danzer, 2006)	17
Obr. 1.6 Zjednodušené náhradní schéma jedné fáze (Danzer, 2008)	18
Obr. 1.7 Trojfázový střídač (Javůrek, 2003)	19
Obr. 3.1 Příklad fyzického uspořádání napájeného úseku	33
Obr. 3.2 Schematické zobrazení obvodu sestaveného dle Obr. 3.1	33
Obr. 4.1 Blokové schéma moderního vozidla s možností rekuperace (Bošek, 2016)	44
Obr. 4.2 Schéma rekuperující lokomotivy pro simulaci	45
Obr. 5.1 Schéma měničny pro simulaci	48
Obr. 5.2 Schéma trakční transformovny pro simulaci	49
Obr. 6.1 UML diagram tříd představujících snímek vlaku	52
Obr. 6.2 UML diagram rozhraní zpracovávaných při řešení elektrického obvodu	53
Obr. 6.3 Topologie obvodu pro SpiceSharp	54
Obr. 7.1 Ukázka grafického rozhraní pro správu souprav a jízdních řádů	60

Seznam tabulek

Tab. 1.1 Fyzikální podstata koeficientů rovnice vozidlových odporů	12
Tab. 3.1 Definiční obor hodnot prvků v sestavovaném obvodu	34
Tab. 3.2 Vybrané elektronické prvky implementované knihovnou SpiceSharp	36
Tab. 4.1 Koeficienty přítláčné síly špalíkových brzd (International Union of Railways, 2004)	39
Tab. 5.1 Měrná vodivost kolejové zpětné cesty (Doleček, 2012)	47

Seznam pramenů

- [1] Antonický, S., 1984. *Mechanika vlakové dopravy*. Bratislava: ALFA Bratislava.
- [2] Bošek, P., 2016. *Koordinace ochran na systému 3 kV DC s ohledem na rekuperaci*, Pardubice: Univerzita Pardubice.
- [3] Danzer, J., 2004. *Elektrická trakce 1 - Přehled problematiky*, Plzeň: Západočeská univerzita Plzeň.
- [4] Danzer, J., 2006. *Elektrická trakce 2 - Stupňové řízení sériového motoru*. Plzeň: Západočeská univerzita Plzeň.
- [5] Danzer, J., 2008. *Elektrická trakce 4 - Vozidla s asynchronním trakčním motorem*. Plzeň: Západočeská univerzita Plzeň.
- [6] Danzer, J., 2008. *Elektrická trakce 8 - elektrické ovládání brzd*, Plzeň: Západočeská univerzita Plzeň.
- [7] Doleček, R., 2012. *Energetika kolejové dopravy*. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera.
- [8] Federální ministerstvo dopravy, 1979. *Předpis ČSD - V7: Trakční výpočty*. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů.
- [9] International Union of Railways, 2004. *UIC 544-1 Brakes - Braking power*, Paris: International Union of Railways.
- [10] Javůrek, J., 2003. *Regulace moderních elektrických pohonů*. Praha: Grada Publishing.
- [11] Mlynařík, L., 2011. *Elektrická trakce 1*. Pardubice: Dopravní fakulta Jana Pernera.
- [12] Prachař, R., 2010. *Jízdní odpory vozidel*, Brno: Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství.
- [13] Široký, J., 2003. *Mechanika v dopravě 1 - kolejová vozidla*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [14] Trávníček, J., 1988. *Energetika v dopravě*. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů.

